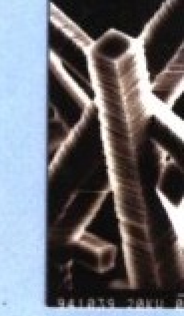
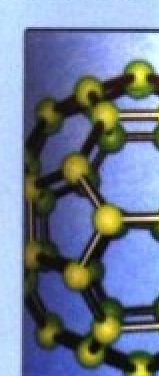
中国材料工程大典

中国机械工程学会 中国材料研究学会

中国材料工程大典编委会

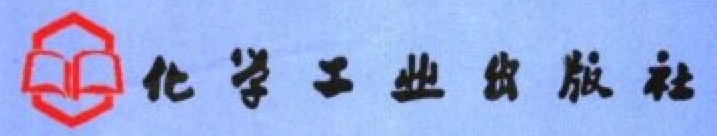
CMDC



第4卷 有色金属材料工程（上）

黄伯云 李成功
石力开 邱冠周 左铁镛
主编



CHINA MATERIALS ENGINEERING CANON

参编学会

中国金属学会 中国化工学会 中国硅酸盐学会 中国有色金属学会 中国复合材料学会



第1卷 材料工程基础
主编：师昌绪 钟群鹏 李成功

第2卷 钢铁材料工程(上)
主编：干勇 田志凌 董瀚 冯涤 王新林

第3卷 钢铁材料工程(下)
主编：干勇 田志凌 董瀚 冯涤 王新林

■ 第4卷 有色金属材料工程(上)
主编：黄伯云 李成功 石力开 邱冠周 左铁镛

第5卷 有色金属材料工程(下)
主编：黄伯云 李成功 石力开 邱冠周 左铁镛

第6卷 高分子材料工程(上)
主编：杨鸣波 唐志玉

第7卷 高分子材料工程(下)
主编：杨鸣波 唐志玉

第8卷 无机非金属材料工程(上)
主编：江东亮 李龙土 欧阳世翕 施剑林

第9卷 无机非金属材料工程(下)
主编：江东亮 李龙土 欧阳世翕 施剑林

第10卷 复合材料工程
主编：益小苏 杜善义 张立同

第11卷 信息功能材料工程(上)
主编：王占国 陈立泉 屠海令

第12卷 信息功能材料工程(中)
主编：王占国 陈立泉 屠海令

第13卷 信息功能材料工程(下)
主编：王占国 陈立泉 屠海令

第14卷 粉末冶金材料工程
主编：韩凤麟 马福康 曹勇家

第15卷 材料热处理工程
主编：樊东黎 潘健生 徐跃明 佟晓辉

第16卷 材料表面工程(上)
主编：徐滨士 刘世参

第17卷 材料表面工程(下)
主编：徐滨士 刘世参

第18卷 材料铸造成形工程(上)
主编：柳百成 黄天佑

第19卷 材料铸造成形工程(下)
主编：柳百成 黄天佑

第20卷 材料塑性成形工程(上)
主编：胡正寰 夏巨谌

第21卷 材料塑性成形工程(下)
主编：胡正寰 夏巨谌

第22卷 材料焊接工程(上)
主编：史耀武

第23卷 材料焊接工程(下)
主编：史耀武

第24卷 材料特种加工成形工程(上)
主编：王至尧

第25卷 材料特种加工成形工程(下)
主编：王至尧

第26卷 材料表征与检测技术
主编：徐祖耀 黄本立 鄢国强



ISBN 7-5025-7306-2
定价：150.00元

中国材料工程大典

中国机械工程学会　中国材料研究学会

中国材料工程大典编委会

第4卷　有色金属材料工程(上)

黄伯云　李成功
石力开　邱冠周　左铁镛　主编

（京）新登字 039 号

内 容 简 介

中国材料工程大典是中国机械工程学会和中国材料研究学会共同组织全国 39 位院士、百余位各学科带头人、千余位材料工程专家共同执笔编写，全面反映当今国内外材料工程领域发展的最新资料和最新成果，集实用性、先进性和权威性于一体的大型综合性工具书。中国材料工程大典包括材料工程基础、钢铁材料工程、有色金属材料工程、高分子材料工程、无机非金属材料工程、复合材料工程、信息功能材料工程、粉末冶金材料工程、材料热处理工程、材料表面工程、材料铸造成形工程、材料塑性成形工程、材料焊接工程、材料特种加工成形工程、材料表征与检测技术等内容，涵盖了材料工程的各个领域，将最新的实用数据（特别是与国际接轨的标准数据）、图表与先进实用的科研成果系统地集合起来，并附应用实例，充分展示了材料工程各领域的现状和未来。中国材料工程大典不仅可以满足现代企业正确选材，合理用材，应用先进的材料成形加工技术，提高产品质量和性能，降低产品成本，增强产品市场竞争力的需要，而且对推动中国材料科学与材料成形加工技术的不断创新，促进制造业的发展，提高我国制造业的竞争能力，具有重要的现实意义。

本书为第 4 卷，有色金属材料工程（上）。内容包括铝及铝合金，镁及镁合金，铜及铜合金，镍、钴及其合金，锌、铅、锡及其合金，钛及钛合金等。

本书主要供具有大专以上文化水平，从事材料工程研究的工程技术人员在综合研究和处理有色金属材料工程的各类技术问题时使用，起备查、提示和启发的作用，也可供研究人员、理工院校的有关师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

中国材料工程大典．第 4 卷，有色金属材料工程．上/黄伯云等主编．—北京：化学工业出版社，2005.8
ISBN 7-5025-7306-2

Ⅰ．中…　Ⅱ．黄…　Ⅲ．①材料科学②有色金属－金属材料　Ⅳ．①TB3②TG146

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2005）第 094448 号

中国材料工程大典
第 4 卷
有色金属材料工程（上）
中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会
黄伯云等　主编
责任编辑：周国庆　陈志良　李骏带
责任校对：蒋　宇
封面设计：雷嘉琦

*

化学工业出版社出版发行
（北京市朝阳区惠新里 3 号　邮政编码：100029）
购书咨询：（010）64982530
（010）64918013
购书传真：（010）64982630
http://www.cip.com.cn

*

新华书店北京发行所经销
北京蓝海印刷有限公司印装
开本 880mm×1230mm 1/16　印张 48½　字数 2227 千字
2006 年 1 月第 1 版　2006 年 1 月北京第 1 次印刷
ISBN 7－5025－7306－2
定价：150.00 元

鸣　　谢

在编写过程中，得到以下部门和单位的支持和协作，使《中国材料工程大典》得以顺利编撰完成。在此，中国材料工程大典编委会代表全体作者表示衷心感谢!

支持部门：中华人民共和国科学技术部
国防科学技术工业委员会
国家自然科学基金委员会
中国科学技术协会
中国科学院
中国工程院

协 作 单 位

钢铁研究总院
北京有色金属研究总院
北京航空材料研究院
中国建筑材料科学研究院
中国科学院金属研究所
中国科学院上海硅酸盐研究所
上海宝钢集团公司
中国石油化工集团公司
中国铝业公司
清华大学
中南大学
太原钢铁集团公司
西北有色金属研究院
宁夏东方有色金属集团公司
华中科技大学
中国第二重型机械集团公司
北京科技大学
北京航空航天大学
中国航天集团第703研究所
中国特种设备检测研究中心
哈尔滨工业大学
贵州安大航空锻造公司
东北大学
西安重型机械研究所
中国科学院半导体研究所
四川大学
北京航空制造工程研究所
中国科学院物理研究所
西北工业大学
北京矿冶研究总院
沈阳铸造研究所
江苏法尔胜公司

序

材料是当代社会经济发展的物质基础，也是制造业发展的基础和重要保障。进入21世纪以来，随着经济全球化的发展和中国的崛起，现代制造业的重心正不断向中国转移。据统计，今天中国制造业直接创造国民生产总值的1/3以上，约占全国工业生产的4/5，为国家财政提供1/3以上的收入，占出口总额的90%。但是与发达国家相比，我国制造业的水平不高、自主创新能力不足、高端市场竞争力还不强。我国虽然已是世界制造业大国，但还不是世界制造业强国。在有关因素中，材料工程基础薄弱是制约我国制造业发展的关键因素。广义的材料工程包括材料制备、测试和加工成形过程。为了提高我国制造业的水平和竞争力，突破材料工程这个薄弱环节，中国机械工程学会和中国材料研究学会牵头，会同中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会、中国复合材料学会共同组织编撰《中国材料工程大典》(简称《材料大典》)，其目的是力图为我国制造业提供一部集科学性、先进性和实用性于一体的综合性专业工具书。以满足广大科技工作者的迫切需求，为科技自主创新和我国制造业的崛起加强技术基础。

经过5年多的艰苦努力，《材料大典》终将出版了。这部共26卷约7000万字的巨著，是39位两院院士和1200余位参编专家教授们辛勤劳动的智慧结晶。有的作者为此牺牲了健康，如一位退休了的总工程师，为了把他多年的研究成果和实践经验写成书稿，由于长时间写作，导致眼睛视网膜脱落……。这种敬业精神与坚强毅力是值得我们学习铭记的。借此机会，我们要感谢中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会、中国复合材料学会的支持。这些学会的众多专家教授积极参与了《材料大典》编写工作，与中国机械工程学会和中国材料研究学会的专家教授一起完成这项艰巨任务，从而使《材料大典》在完整性与先进性、科学性与实用性的结合上得到了加强；我们要感谢科学技术部、国防科学技术工业委员会、国家自然科学基金委员会、中国科学技术协会、中国科学院、中国工程院，以及各协作单位对编写工作的大力支持和积极帮助；我们也要感谢师昌绪院士等顾问的殷切指导，他们在编委会的两次工作会议上提出了许多重要的意见和建议，平时也给予了经常关心和指导，使我们少走了许多弯路；我们还要对关心和支持《材料大典》编写工作的科研院所、院校、企业以及有关人员表示感谢。没有大家的支持与协同，就不可能有《材料大典》的成功编写和顺利出版。

《材料大典》既总结了10多年来在材料工程方面的最新数据、图表及科研成果，还汇集了国内外在材料工程方面的成熟经验和先进理念，它体现了科学性、先进性和实用性的结合。可供具有大专以上文化水平的有关工程技术人员查阅使用，也可供理工院校的师生参考。

编撰《材料大典》涉及范围广，难度大，书中不可避免地会存在一些缺点和不足之处，恳请各位读者指正。

中国机械工程学会理事长
中国材料工程大典编委会主任

2005年9月23日

前　言

《有色金属材料工程》是《中国材料工程大典》中的卷目之一。

如何正确选材，合理用材，尽可能挖掘材料使用性能的潜力，提高材料利用率和循环使用率，以节约材料、节约能源，保证国民经济的可持续发展，这是广大科技人员急需解决的问题，也是编写《中国材料工程大典》中《有色金属材料工程》卷的目的。

在元素周期表中，除铁、铬、锰以外的金属元素统称为有色金属，国际统称非铁金属。各种有色金属元素都具有各自的独特性能。现代科技的发展，对材料提出了千差万别的各种特殊性能的要求，很大部分都是依靠发展有色金属材料来得到满足的。因此，有色金属材料的发展受到各国的高度重视。到 2004 年我国常用有色金属产量约 1500 多万吨，跃居世界第一位。今后，随着我国经济建设规模的不断扩大，对有色金属材料的需求，在产量、品质、品种等方面都将提出更高的要求。这对有色金属工业既是机遇，也是挑战。

根据大典编委会提出的大纲要求，经过有关专家多次讨论修改后，确定本卷共分 14 篇，约 470 万字，分上、下两册出版。为尽可能全面系统地反映有色金属材料的现状与发展，邀请了中南大学、北京科技大学、西北有色金属研究院、昆明贵金属研究所、北京有色金属研究总院、北京航空材料研究院、宁夏 905 厂、北京工业大学等单位的 68 位相关领域的专家参加编写和审稿。全书由黄伯云、李成功、石力开、邱冠周、左铁镛任主编，历时 4 年完稿。

各篇的主编如下：

篇	名称	主编
第 1 篇	概论	黄伯云　邱冠周
第 2 篇	铝及铝合金	田荣璋　肖亚庆
第 3 篇	镁及镁合金	黎文献
第 4 篇	铜及铜合金	汪明朴　尹志民
第 5 篇	镍、钴及其合金	唐仁政
第 6 篇	锌、铅、锡及其合金	田荣璋
第 7 篇	钛及钛合金	李成功　马济民　邓　炬
第 8 篇	钨、钼及其合金	王德志　潘叶金
第 9 篇	硬质合金	吴恩熙
第 10 篇	钽、铌及其合金材料	何季麟
第 11 篇	铍、锆、铪及其合金材料	刘建章　聂大钧
第 12 篇	贵金属及其合金材料	孙加林　张康侯　宁远涛　张永俐
第 13 篇	有色金属层状复合材料	张新明　谢建新
第 14 篇	有色金属新材料	石力开　左铁镛

本书是目前有关有色金属材料方面最全面、最系统的工具书。具有数据详细、齐全、新颖以及实用性和先进性相统一等特点。可供制造业和其他相关行业的工程技术人员，管理人员以及材料科学与工程专业的师生查阅。

由于内容多、时间紧和编著者水平所限，其中难免存在不少问题和不足，敬请广大读者批评指正。

黄伯云　李成功

石力开　邱冠周　左铁镛

2005 年 10 月 24 日

目　　录

中 国 材 料 工 程 大 典
CHINA MATERIALS ENGINEERING CANON

第4卷 有色金属材料工程(上)

第1篇

概 论

主 编 黄伯云 邱冠周

编 写 黄伯云 邱冠周

审 稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会

有色金属是指元素周期表中除铁元素以外的所有金属元素。西方国家习惯上称为非铁金属（Non-ferrous Metals)。而前苏联和现在的俄罗斯则习惯称为有色金属（Цветные Металлы)。由于历史的原因，我国也一直称有色金属。有色金属一般又可分为轻有色金属、重有色金属、稀有金属、稀土金属、贵金属、放射性金属和半金属。

由于半金属硅、锗是半导体，已成为信息功能材料的主体；而稀土金属虽然作为微量合金化元素在有色金属合金中应用很广，但稀土金属合金的主要用途都涉及信息技术，所以半金属和稀土金属在本大典的信息功能材料卷中将专门介绍；放射性金属则由于其特性和用途的特殊性，一般制造业很少涉及，故本卷也不包括。本卷共14篇，主要包括轻有色金属铝、镁及其合金，重有色金属铜、镍、钴、锌、铅、锡及其合金，稀有金属钛、铍、锆、铪、钨、钼、钽、铌及其合金，硬质合金，贵金属及其合金，有色金属新材料等。鉴于有色金属材料的层状复合材料种类很多，应用很广，在本大典的复合材料卷中又没有介绍，故在本卷中专门设一篇金属层状复合材料。

材料是人类赖以生存和发展的物质基础，也是现代高新技术四大支柱（能源、信息、生物、新材料）之一，而材料又是其他高新技术的基础，这些观点已经成为人们的共识。为了让读者能具体了解有色金属材料在国民经济建设中的作用和地位，以及目前有色金属材料发展的概况，下面将分别扼要介绍。

1 有色金属材料在国民经济建设中的作用和地位

有色金属品种繁多，各种有色金属都具有各自的独特性能，其合金材料具有一系列的奇异功能。现代科学技术的发展，对材料提出了千差万别的特殊性能的要求，大都靠有色金属材料的发展来得到满足。

有色金属材料在解决人类面临的资源枯竭、环境污染、人口剧增的三大难题中，也将起着重要的作用。科学技术的进步，高新技术的发展，国防的现代化建设以及人民生活水平的提高，都有赖于有色金属材料的发展和支撑，可以说没有先进的有色金属材料的发展，就没有国防的现代化，没有日新月异的高新技术，没有现代化的工业，也没有高质量的人民生活。有色金属材料生产的技术水平和规模及其应用程度已经成为衡量一个国家综合国力的重要标志之一。

1.1 有色金属材料在国防现代化建设中起着关键作用

从近一个多世纪的发展历史看，许多高新技术往往都是从军事工业开始发展起来的。例如原子能技术、航天航空技术都是如此。这些军事技术的发展都要求在较短时间内能提供大量性能优异、特殊、高质量、高可靠性、品种规格多样的新型材料。这些新型材料中有色金属材料占有很大比重。例如先进战机性能的提高就需要新型铝合金（如铝锂合金）、高温钛合金（工作温度达600℃～650℃)、高强高韧钛合金（$\sigma_b \geq 1\ 250$ MPa）等结构材料。图1-1是美国歼击机应用铝锂合金的情况。提高钛合金在飞机主要结构和发动机上的用量，可以有效降低飞机的结构质量系数和提高发动机的推重比。美国B-2重型轰炸机和F-22歼击机中钛合金的用量分别达到26%和35%。由于钛及钛合金具有高比强，优良的耐腐蚀性和透声性、无磁等特性，成为制造潜艇的耐压壳体、武器系统、核动力系统、声呐系统的主要材料。例如俄罗斯建造的阿尔法级潜艇和带有24枚战略导弹的“台风”级潜艇，都应用了大量的钛合金，使潜艇性能达到了深、静、快、强攻击型目标，属于世界一流水平。

制造火箭、人造卫星、航天飞机的材料要求具有高的比强度，以减小其质量，所以铝合金、钛合金都是这些航天器的重要结构材料，如燃料箱、助燃剂贮箱以及许多其他结构部件都大量使用铝合金。美国阿波罗运载火箭共使用了450 t铝合金，土星5号运载火箭使用了102 t铝合金。洲际导弹惯性平台上用的陀螺仪的全部结构材料，几乎都是用铍制作的，对增加射程、提高命中精度起关键作用。

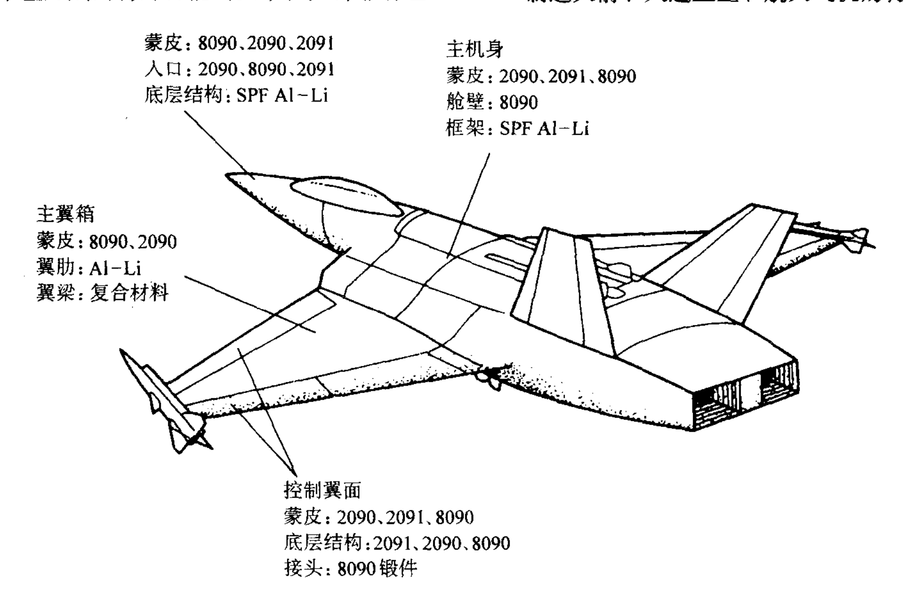


图1-1 铝锂合金在歼击机上的应用情况

锆是发展核技术的不可替代的关键材料，被誉为“原子能时代的第一金属”，核潜艇的核动力堆的燃料包套、容器管、压力管、格架、端塞和其他堆芯结构都必须使用锆材；铍也是发展核武器的关键材料，用铍做氢弹核心部分的反射层，对增大裂变板机的爆炸威力起十分重要的作用。

过去人们认为兵器装备就是“钢铁加炸药”。但随着现代兵器技术和新材料技术的发展，有色金属材料已成为现代兵器所依赖的重要战略物质和关键技术之一。例如反装甲动能穿甲弹的弹芯材料主要是碳化钨和高强高韧钨重合金，反装甲化学能破甲弹的药型罩目前广泛使用铜材，美国海尔法

导弹的串联药型罩的前驱罩采用钼材，大大提高了射流侵彻威力，药型罩的射流侵彻威力与罩材密度成正比，密度大于 $17.5\ g/cm^3$ 的钨基合金药型罩是各国正在开发的新材料。目前快速反应部队要求兵器轻量化，铝合金已成为牵引炮和装甲车辆的重要结构材料。

关于信息技术在现代战争中的关键作用，人们通过海湾战争和伊拉克战争已有清醒的认识，称"海湾战争是硅芯片战胜钢铁的战争"，是"信息化的战争"。这除了依靠高性能高可靠的半导体材料外，还涉及许多有色金属功能材料。

以上所述只是有色金属材料在国防现代化建设中起关键作用的几个实例，总之，陆、海、空、导弹等各军、兵种的武器装备的不断更新和现代化，有色金属新材料都是不可缺少的关键材料，大到运载火箭、战略导弹、飞机、舰艇的大型结构部件，小到电子元器件上的一个小触点、一根引线，有色金属材料都起着不可替代的作用。

基于有色金属材料在国防现代化中所占有的重要地位，许多国家都把有色金属如铀、铍、钽、钨、锗、铂族金属等列为国家储备的战略物资。

1.2 有色金属材料与高新技术的发展息息相关

当代正在兴起和蓬勃发展起来的高新技术群，是以信息技术为核心，包括新能源、生物工程、激光技术、海洋开发、空间技术和新材料等为标志的新兴技术群，新材料既是这些高新技术群的一部分，又是其他高新技术发展的前提和基础。在新材料技术中，有色金属材料占有十分重要的地位。众所周知，如果没有现代的耐高温、高强度、低密度的结构材料（如耐高温镍合金、钛合金、高强铝合金等）以及各种微电子功能材料，便不可能有今天的宇航工业；当今信息技术的飞速发展就是建立在硅、砷化镓等先进半导体材料的发展基础之上的；激光晶体是重要的激光材料，它是发展激光技术的基础，其基质晶体大都是稀土金属氧化物（或氟化物），其激活离子也都是稀土金属；性能优良的储氢材料，如 AB_5 型稀土系合金、镁系、钛镍系等储氢合金是发展 Ni-MH 电池不可缺少的基础材料，有色金属锆、钛、锂、铍是发展核能的主要支撑材料。

从另一角度来说，当前有一些高新技术难以实现，主要原因就是材料问题没有解决。例如太阳能是取之不尽、用之不竭、而又没有污染的理想能源，估计地面获得的太阳能相当于目前全世界总发电能力的十几万倍。可惜现在我们还没有解决价廉、寿命长、光电转换效率高的材料把光能转变成电能。目前非晶硅太阳能电池是20世纪70年代中期发展起来的一种新型薄膜太阳能电池，它的大面积光电转移效率由开始的1%～2%提高到了13%，但是大规模工业应用仍然成本太高，所以目前除普遍应用于手表、计算器等小型电池外，仅有少数几个兆瓦级太阳能独立电站建设的报道。如果把材料的大面积光电转换效率继续提高到15%～18%以上，就可以和火力发电竞争了。另一个由于材料问题没有解决而无法实现的高新技术事例，是用高温结构陶瓷制造内燃机。这种结构陶瓷主要是一些有色金属的氧化物、氮化物、硼化物、碳化物等组成，由于目前这些结构陶瓷的脆性太大，性能也不够稳定，尚难以在工程上大量应用。如果它们的脆性问题和质量稳定性问题能获得进一步解决，内燃机可以用高温结构陶瓷来制造，那么就可以取消水冷，从而可以减少燃料消耗30%，提高热效率50%。这对于当前能源需求日益增加，资源逐渐枯竭的形势来说具有非常重要的意义。以上所述只是少数几个事例，但已经充分说明了有色金属材料是发展高新技术的前提和基础。

此外，高新技术发展的需要又大大推动了有色金属新材料的不断发展。例如军用战机性能要求提高，燃料价格上涨，要求飞机结构质量进一步减小，这些都促进了高温钛合金、高强韧钛合金、高强韧铝合金以及低密度高强韧铝锂合金的发展；电子计算机的小型化、高速化和多功能化，进一步带动了单晶硅材料向无缺陷、高均匀、大直径发展，并推动了第二代、第三代半导体材料砷化镓、氮化镓的问世；也促进了高记录密度、高保真、长寿命的信息记录材料（如钆钴合金）的出现。

总之，有色金属材料与高新技术的发展是息息相关的，我国过去两弹一星的试验成功和航天技术的发展，直到最近载人航天飞行的胜利返航，就非常深刻地揭示了这种息息相关的关系。

1.3 有色金属材料是国民经济各部门发展的物质基础，也对保证国民经济可持续发展起重大作用

有色金属材料在国民经济各部门的应用十分广泛，作为国民经济发展的基础材料，占有十分重要的地位。

铝是产量仅次于钢铁的第二大金属，除了前述国防工业中铝合金是关键材料外，在能源、交通、电子、建筑、轻工等产业中都占有十分重要的地位。如电力传输用电线、电缆，铝是仅次于铜的主要材料。在各种车辆中，铝及铝合金用量一直呈上升趋势，特别是为了节约能源，车辆力求轻量化是当前全球范围的一个重要趋势，目前汽车用铝合金仅占汽车用材料总量的4%～5%，日本轻合金协会预计，未来汽车用铝合金的量将达到材料总量的12%。铝合金用于汽车散热器在欧洲已达到90%，美国约占60%；铝合金的汽车轮毂有良好的功能和外观，在小车中已普遍应用；铝合金铸造的汽缸体在价格上可以与灰口铁竞争，除了性能满足要求和质量小以外，铝合金的导热率大大高于铸铁，可大大减少冷却剂用量。铁路车辆中铝合金用量也呈上升趋势，特别是欧洲和日本的高速列车上都广泛采用了铝合金，如大型薄壁宽幅带肋板材以及大型薄壁空心型材等。电子工业中电容器铝箔的用量仅次于食品包装，高比电容的电容器铝箔对增大电容量、减小电容器体积具有重要意义。铝合金在建筑行业中制造门窗框架、护墙等已是铝合金重要应用领域之一，我国铝合金加工材的30%左右应用于建筑行业。

镁合金材料密度低，比强度、比刚度高，导热导电性、阻尼性、电磁屏蔽性都好，易于回收，与环境的兼容性优良，因此是新世纪最有发展潜力的金属材料，也称为21世纪绿色工程材料。镁合金除了在航空航天工业中有重要的用途外，自20世纪70年代能源危机以后，在汽车工业中的应用日益受到重视。1997年全球十大汽车公司的用镁量为4.5万吨，到2000年猛增至9万吨。目前全球用于汽车零部件的镁合金用量将以年增长15%的速度发展。此外镁合金在电子行业中的应用也发展十分迅速，特别是"3C"产业中，便携电脑和移动电话等的镁合金外壳的应用日益扩大。

铜及铜合金具有优良的导电性、导热性和耐腐蚀性，容易加工成形，并且有高的强度、弹性和耐磨性，广泛应用于电气、电子、机械、仪表、造船、建筑和轻工等工业部门，所以随着国民经济的飞速发展，铜加工材的消费量迅速增长，我国20世纪90年代以来铜及铜合金材料的消费量，以平均每年递增21%以上的速率增长。作为电力传输的电线电缆，电机制造中的线圈，铜材是目前最好的、无法取代的材料。其他如空调管、高效散热管、长冷凝管、特薄水箱带、高精度引线框架带材、弥散强化高强高导铜材等，都成为我国各工业部门发展的关键材料。

钛具有密度低、比强度高、耐蚀性优良、耐温区宽、线胀系数小、无磁无毒、生理相容好等优点，并具有储氢、超导、超弹、高阻尼和形状记忆等特殊功能。钛及钛合金在空

间、海洋、军事工业、一般民用工业、医疗、人体植入、人们日常生活等各个部门都有广泛的用途，被称为“全能的金属”，所以钛材的需求量越来越大，已成为正在崛起的第三大金属。钛及钛合金材料约50%是用于航空航天，另外50%用于化工、石化、能源、医疗、汽车、建筑、体育等民用领域，我国随着GDP的迅速增长，近几年来对钛材的需求量以30%的速度增长，2003年表观需求量已达到9 000 t，超过了日本国内的消费量。我国将成为仅次于美国的第二大钛材消费国。

稀有金属钨、钼、钽、铌、锆、铪等，它们都以一系列特殊性能而成为国民经济发展中极其重要的材料。钨丝作为灯丝应用已有近100年历史，但至今仍然是难以完全替代的材料，我国钨的储量、产量、外贸出口量均居世界第一位，据资料统计我国钨的消耗量也是世界第一，钨45%消耗于硬质合金生产，我国硬质合金的产量2003年已达12 000 t，占世界硬质合金产量的1/3，我国已是世界上第一个硬质合金生产大国。硬质合金的产量与质量的提高对机械制造、矿山开采等工业的发展起着十分重要的作用。钽作为电容器材料，使电容器向轻、薄、小型化、可靠性方向发展成为可能，大大促进了现代通讯工具的小型化。

贵金属材料是化学工业催化技术发展的基础性关键材料，也是汽车尾气净化的重要材料，铂及铂合金是发展玻璃纤维工业的不可替代的材料。

从以上事例中可以清楚看出有色金属材料在国民经济发展中所占有的重要地位，可以说每一种有色金属材料都在国民经济中起着不可替代的作用。

1.4 有色金属材料与人民生活是密切相关的

随着社会经济的不断发展，人民生活水平的迅速提高，现代家庭用品，如电冰箱、空调、电视机、录相机、洗衣机、电话、移动电话的普及，有色金属材料已经从多方面和人们的日常生活直接相关；人民居住条件的改善，铝材大规模的进入建筑行业，使千家万户都成为铝材的用户。近十多年来，食品和饮料的刚性、半刚性、柔性包装大量采用铝材，美国包装用铝约占铝消耗总量的20%，我国占8%～12%，而各种容器、器皿、炊具的铝制品更是普及到了每家每户。随着生活水平的提高，人们对饰品和艺术装饰的需求也越来越高，我国已成为世界最大的黄金首饰消费国，和仅次于日本的第二大铂首饰消费国。

2 有色金属材料发展现状

2.1 世界有色金属发展概况

由于有色金属材料在国民经济建设中的重要作用，有色金属材料的发展受到世界各国的高度重视。自20世纪90年代以来，全世界钢的产量基本上保持平衡，但有色金属仍以年平均增长2.26%的速度发展。1990年世界有色金属总产量为4 967.79万吨，1998年增长至5 827.75万吨，2002年又增加至6 836.16万吨。

表1-1为2000～2002年世界各主要国家和地区，有色金属总产量和消费量的增长情况，表1-2为有色金属出口量和进口量的增长情况以及2002年的排位顺序。

表1-1 2000～2002年世界各主要国家和地区，有色金属总产量和消费量增长情况和排位顺序 万吨

产量					消费量				
位次(2002年)	国家和地区	年份			位次(2002年)	国家和地区	年份		
		2000	2001	2002			2000	2001	2002
1	中国	798.43	905.95	1 042.75	1	美国	1 219.9	1 071.08	1 053.54
2	美国	1 159.24	988.69	935.12	2	中国	759.9	815.68	935.36
3	俄罗斯	473.17	482.45	485.56	3	日本	481.3	433.85	427.50
4	加拿大	442.44	445.00	477.53	4	德国	385.1	377.26	376.60
5	日本	398.72	390.52	392.51	5	韩国	251.8	247.63	275.34
6	澳大利亚	322.40	343.98	350.41	6	意大利	217.6	212.73	225.15
7	德国	288.64	294.83	303.94	7	法国	204.37	196.04	188.10
8	智利	270.20	291.56	288.09	8	中国台湾省	169.84	132.33	161.80
9	巴西	200.42	191.04	215.38	9	俄罗斯	117.25	130.22	150.63
10	挪威	153.65	156.01	160.99	10	西班牙	127.19	126.43	137.19

表1-2 2000～2002年世界各主要国家和地区，有色金属出口量和进口量增长情况和排位顺序 万吨

出口量					进口量				
位次(2002年)	国家和地区	年份			位次(2002年)	国家和地区	年份		
		2000	2001	2002			2000	2001	2002
1	俄罗斯	414.58	397.51	375.45	1	美国	501.32	508.73	533.58
2	智利	251.84	269.64	276.72	2	日本	324.18	288.65	275.65
3	加拿大	289.72	299.64	253.22	3	德国	269.76	254.27	253.27
4	澳大利亚	222.16	225.69	215.36	4	中国	161.61	89.59	192.65
5	中国	141.97	150.28	179.60	5	意大利	160.35	57.83	175.17
6	挪威	118.48	143.27	129.50	6	韩国	157.19	50.25	169.00
7	巴西	80.48	63.26	84.88	7	中国台湾省	169.65	36.53	165.42
8	哈萨克斯坦	77.72	76.24	78.30	8	法国	133.88	27.40	125.51
9	荷兰	76.36	72.90	77.85	9	比利时	74.16	90.92	90.70
10	德国	56.99	65.48	67.97	10	英国	84.87	80.67	83.34

有色金属材料的发展不仅表现在产量和消费量的快速增长，而且材料的品种规格日益增多，性能质量不断提高，成本逐渐降低，具有各种特殊性能的新材料不断涌现，材料的各种制备加工新技术、新工艺、新装备也得到了日新月异的发展。

世界有色金属材料发展的另一个重要标志是各国都竞相发展有色金属新材料。

新型高性能铝合金就是美国、俄罗斯、日本、德国、法国、加拿大等国家重点研究发展的方向之一。例如低密度高强可焊铝锂合金，从20世纪80年代开始大力研究，到现在已趋于成熟，并在民航客机和歼击机以及航天器上大量应用，目前在美国铝业协会注册的工业铝锂合金有美国的2090、2091、2094、2095、2195、2197、X2096，欧洲铝业协会的8090，英国的8091，法国的8093，俄罗斯的ВАД23等。高强高韧抗应力腐蚀铝合金的研究中，西方国家和俄罗斯都开发出了许多新牌号，性能达到了很高的水平，例如90年代开发的7055合金厚板，在T7751状态下$\sigma_b = 648$ MPa，$\sigma_{0.2} = 634$ MPa，$\delta = 11\%$，$K_{IC} = 26.4$ MPa·m$^{1/2}$（ST）。挤压件$\sigma_b = 661$ MPa，$\sigma_{0.2} = 641$ MPa，$\delta = 10\%$，$K_{IC} = 27.5$ MPa·m$^{1/2}$（ST）。其他如铝钪合金、新型耐热、耐磨、超高强铝合金，铝基复合材料等都是竞相研究的课题，新成果不断涌现。

新型钛合金也是先进国家当前研究的关键材料之一。如工作温度在600℃以上的高温钛合金，$\sigma_b > 1\,250$ MPa的高强高韧钛合金、低成本钛合金、新型阻燃和耐蚀功能钛合金等。

镁被称为"21世纪新兴绿色工程材料"，是最有优势的轻质金属结构材料，在航天器和汽车的轻量化以及"3C"产业等领域的应用发展前景十分广阔，所以镁合金新材料也成为当前世界研究的热点。

铜及铜合金是应用历史最久的有色金属材料，铜合金新材料也是当前信息技术领域中不可替代的重要材料，受到普遍重视，例如弥散强化高强高导电铜合金，其$\sigma_b > 600$ MPa，而且导电率可高达90%IACS。

其他如信息功能材料、新能源材料也是很受重视的。

总之，有色金属新材料的研究与开发，是当今世界各发达国家研究得十分活跃的关键领域，投入了大量人力物力，新成果不断涌现，内容包括了各种有色金属结构材料和功能材料，其应用涉及到了各个高新技术领域。

世界有色金属材料发展的第三个标志是材料制备加工技术朝着高效、节能、连续化、自动化、大型化、紧凑化、高精度、高质量方向发展，加工制备的新技术、新工艺、新装备不断涌现，从而促进了过去无法生产的各种优异性能和特殊规格的新材料的诞生，也使材料的生产成本降低，市场竞争能力大大提高。以下列举几个简单的实例。

当前有色金属材料的轧制技术在向大型化、连续化、自动化方向发展。生产铝合金板带材的最大锭坯达到27 t，最大的热轧机已达5 588 mm，热轧板尺寸达5 000 mm × 270 mm × 30 000 mm，热轧的速度为5～8 m/s，并带有在线X射线测厚、激光对中、VC辊等系统，热轧卷厚度公差可小于0.75%；冷轧方面采用大型多辊冷轧机和多机架连轧；挤压机也达到了大型化，最大的3.5万吨立式反向挤压机，可生产ϕ1 500 mm的管材，俄罗斯2万吨卧式挤压机可生产2 500 mm宽的整体铝板材；锻压设备俄罗斯有7.5万吨、法国有6.5万吨、美国有4.5万吨的大型水压机，最大铝合金锻件可达3.5 m^2，1.5 t以上。

铝合金熔炼设备已有150 t的圆形、可倾斜、可开盖，并用计算机控制的燃气炉，其热效率可达50%以上；熔体净化技术方面也不断创新，如无烟在线除气法（FILD）、旋转喷嘴惰性气体浮选法（SNIF）、熔体在线连续处理法（MINT）、Alpur熔体净化法以及快速除气装置RDU熔体净化法等，使铝熔体中含氢量可达到小于0.001 mol/kg的水平，碱金属含量可降到5×10^{-6}以下。

钛合金熔炼技术也日益先进，如冷床炉熔炼技术，包括电子束冷床炉和等离子体冷床炉，可熔炼达25 t，且无偏析、无夹杂的优质钛合金铸锭，还可以生产扁铸锭、空心锭，简化了后续加工。

其他如连铸连轧，包括后来发展的连续铸轧、连续铸挤，以及新近发展的半固态金属连续流变铸造、半固态金属连续复合铸轧技术等都是工艺紧凑化的典型。还有近净成形技术，包括喷射成形、注射成形、超塑成形等都相继问世，日益成熟。

总之，有色金属材料制备加工的新工艺、新技术、新装备层出不穷，不胜枚举，推动着有色金属材料的不断发展。

2.2 我国有色金属材料发展现状

我国有色金属材料工业，从新中国成立50多年来，特别是改革开放20多年来，克服了原料不足、技术落后、装备残缺陈旧和资金不足等种种困难，从无到有、从小到大，逐步建立起我国有色金属材料的工业体系，并成为世界有色金属生产的第一大国，取得了举世瞩目的伟大成就。

到2003年，我国常用有色金属的总产量达到了1 228万吨，跃居世界第一。其中各种金属的总产量分别为，铝596万吨，铜183.6万吨，铅158.4万吨，锌231.8万吨，锑8.98万吨，镁34.17万吨，镍6.47万吨，锡9.8万吨，钨7 390 t，钼2 922 t，海棉钛3 800 t（钛材达6 000 t）。从产量来说，我国已成为名符其实的有色金属生产大国。

新材料的研究开发以及制备加工技术方面也取得了很大进步，通过引进吸收，加工装备的落后面貌已有很大改善，产品的品种规格大量增加，基本满足了我国国防建设和国民经济各部门对有色金属材料的需求。

但是从总体上说我国有色金属材料在产品质量、产品结构、成本效益、加工技术等方面还比较落后，与发达国家相比仍存在较大差距。主要表现在产品结构极不合理；精加工深加工技术落后；总体技术装备水平仍然很低，更新换代慢；高质量、技术含量高的高档产品缺乏，很大一部分依赖进口，而低档产品又过剩。在新材料、新产品的开发方面，主要是仿制，缺少创新，有一些高精尖产品尚不能生产。另外产业结构也极不合理，企业的规模小，产量少，设备利用率低，经济效益差，市场竞争能力弱。

我国要由有色金属材料大国变为有色金属材料强国，还有大量艰苦的工作要做，还需经过若干年坚持不懈的努力。

编写：黄伯云（中南大学）
邱冠周（中南大学）
审稿：唐仁政（中南大学）

参考文献

1 中国工程院，中国科学院．有色金属材料咨询报告．西安：陕西科技出版社，2000
2 中国工程院．中国有色金属材料发展现状及迈入二十一世纪对策，第一次学术研讨会论文集（内部资料），1997
3 中国工程院．中国有色金属材料发展现状及迈入二十一世纪对策，第二次学术研讨会论文集（内部资料），1998

中 国 材 料 工 程 大 典
CHINA MATERIALS ENGINEERING CANON

第4卷 有色金属材料工程（上）

第2篇

铝及铝合金

主 编 田荣璋 肖亚庆

主 审 唐仁政

编 写 田荣璋 肖亚庆 张新明
林 林 郑子樵 陈康华
罗丰华 贺奉嘉 尹志民

审 稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会

第1章 概　　述

1 电解铝（原铝）生产

地壳中平均含铝量为8.0%，次于氧和硅但超过了铁（5.8%），为地球上储量最多的金属元素。因为铝的化学性质活泼，与氧亲和力大，所以在自然矿物中不存在金属纯铝。自然界中铝矿物和含铝矿物有250多种，如刚玉（Al_2O_3）、一水软铝石（$Al_2O_3 \cdot H_2O$）、一水硬铝石（$Al_2O_3 \cdot H_2O$）、三水铝石（$Al_2O_3 \cdot 3H_2O$）、高岭石（$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$）、红柱石（$Al_2O_3 \cdot SiO_2$）等。

世界上90%以上的氧化铝是用铝土矿生产出来的。全世界已探明铝土矿储量有550～750亿吨，其中分布情况为加勒比地区和中美洲20～30亿吨，南美洲190～250亿吨，欧洲30～40亿吨，非洲150～200亿吨，亚洲80～130亿吨，澳洲70～100亿吨。

我国有19个省（市）发现了铝土矿资源，全国铝土矿储量有20多亿吨。

生产金属铝（电解铝），第一步先生产氧化铝。世界上的氧化铝几乎都是用碱法生产的，分拜尔法、烧结法和拜尔烧结联合法。生产1 t金属铝需要2 t氧化铝。据资料介绍，我国电解铝生产2002年需氧化铝为852万吨，国内供应548万吨，进口304万吨。2003年需氧化铝1 100万吨，国内供应615万吨，进口485万吨。拜尔法生产氧化铝流程见图2.1-1。

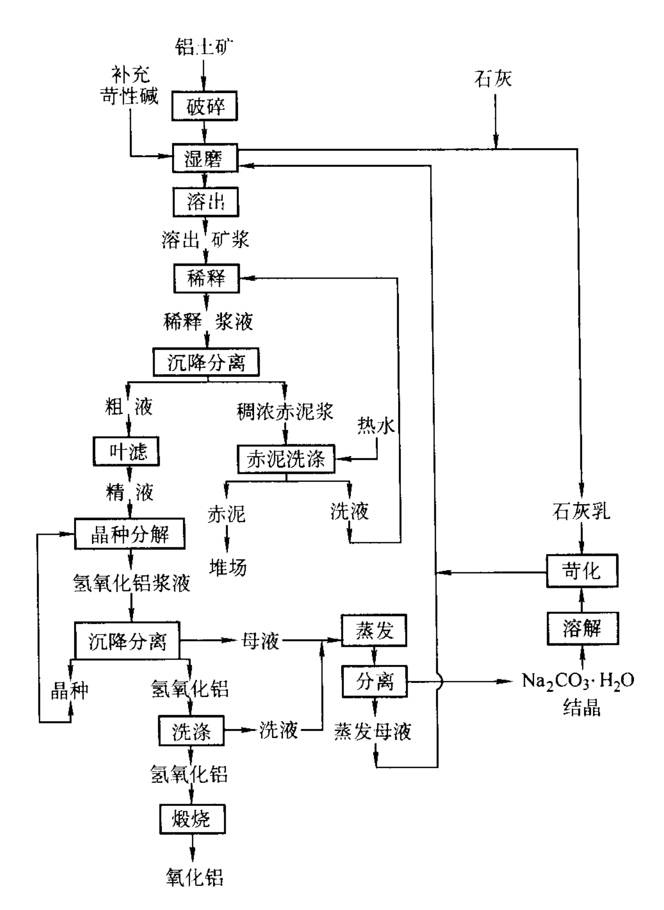


图2.1-1　拜尔法生产氧化铝的基本流程

金属铝生产是用氧化铝为原料，冰晶石为熔剂组成的电解质，在950～970℃下通直流电，使电解质溶液中氧化铝分解，其总反应式为：

$$2Al_2O_3 + 3C \longrightarrow 4Al + 3CO_2$$

在阴极上析出的铝液汇集到电解槽底部，而阳极上析出的二氧化碳和一氧化碳气体进入空气中。铝液从电解槽中抽出放进混合炉中，经过净化，铸成原铝锭。铝电解流程见图2.1-2。

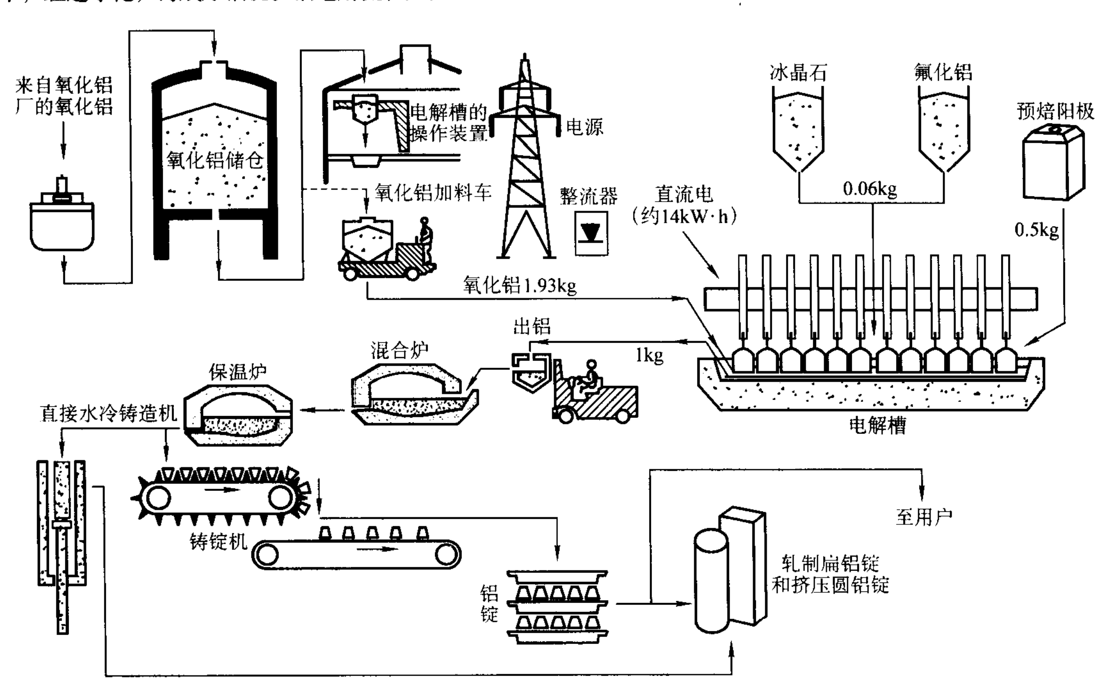


图2.1-2　铝电解流程

2 国内外铝的产量及消费量

2.1 世界原铝供应及消费情况

世界原铝供应及消费情况见表2.1-1。

表2.1-1 世界原铝供应及消费情况 万吨

项目	2000年	2001年	2002年	2003年
供应量	2 442.2	2 446.6	2 608.6	2 795.0
消费量	2 493.5	2 382.0	2 516.9	2 712.4
市场平衡	-51.2	64.6	91.7	82.6

世界五大原铝消费国情况见表2.1-2。

表2.1-2 世界五大原铝消费国消费情况 万吨

国家	1997年	1998年	1999年	2000年	2001年
美国	5 390	5 814	6 203	6 080	5 117
中国	2 260	2 425	2 926	3 499	3 535
日本	2 434	2 082	2 112	2 225	2 014
德国	1 558	1 519	1 439	1 490	1 581
韩国	666	506	814	823	850

2002年世界各地区原铝产量增长速度见图2.1-3。中国增长速度最快达29.5%。

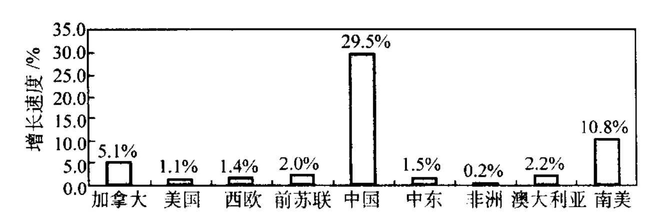


图2.1-3 2002年世界各地区原铝产量增长速度

近5年各大洲铝的消费增长情况见图2.1-4。亚洲是世界上铝消费增长最快的区域之一，仅次于非洲。

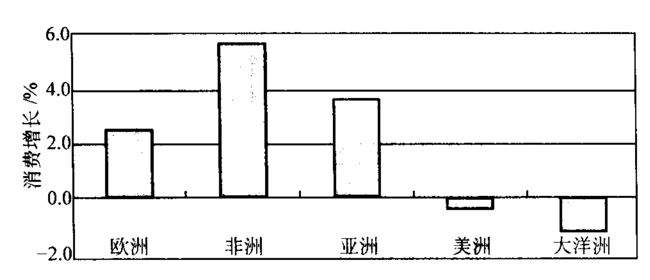


图2.1-4 世界各大洲铝的消费增长情况

2.2 国内原铝供应及消费情况

国内原铝供应及消费情况见表2.1-3。

表2.1-3 国内原铝供应及消费情况 万吨

项目	2000年	2001年	2002年	2003年
产量	282	342	435	544.8
净进口量	70.5	13	-20.6	-49.3
供应量	352.5	355	414.4	495.5
消费量	340	364	420	488.7
市场平衡	12.5	-9	-5.6	6.8

2003年我国原铝锭产量达544.8万吨，比上年增加25%。中国十家大型原铝生产厂排名是：中铝青海分公司(26.9万吨)、青铜峡铝业（24.2万吨)、中铝贵州分公司(23.3万吨)、兰州铝业股份（20.9万吨)、豫港龙泉铝业(20.7万吨)、包头铝业（20万吨)、焦作万方（16.3万吨)、峨嵋山铝业（15.2万吨)、兰州连城铝业（14.6万吨）和中铝广西分公司（13.9万吨)。

1995年以来，中国各年原铝产量见图2.1-5。

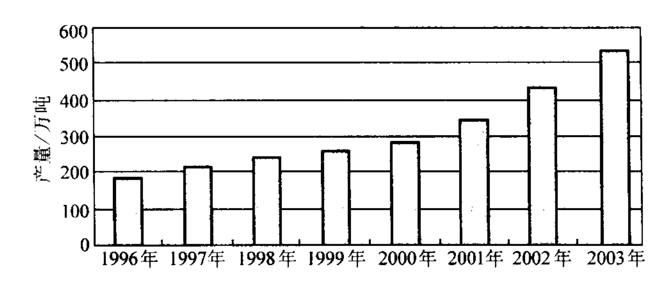


图2.1-5 1995年以来中国各年原铝产量

我国近几年铝及铝合金进出口情况见表2.1-4。

以前，我国是铝及铝合金净进口国，2002年一跃变成净出口国。这是由于我国优先发展铝的政策，使近些年铝业得到了飞速的发展。

表2.1-4 我国铝及铝合金进出口情况 万吨

项目	2000年	2001年	2002年	2003年
进口量	91.4	52.9	58.1	88.1
出口量	20.9	40.9	78.7	124.9
净进口量	70.5	12.0	-20.6	36.8

我国铝型材、铝板带及铝箔进出口情况见图2.1-6～图2.1-8。

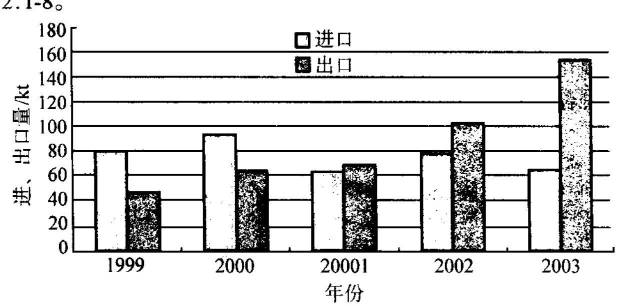


图2.1-6 1999～2003年我国铝型材进出口情况

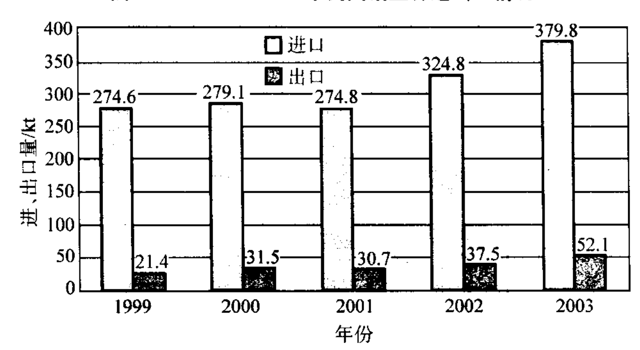


图2.1-7 1999～2003年我国铝板带进出口情况

继2001年以后，我国成为铝型材净出口国。2002、2003年我国铝型材出口量增长均在50%以上，而进口量下降15%，2003年净出口量为9万吨。2002年我国铝板带，仍然是进口量大于出口量，净进口量为28.7万吨。2003年我国铝

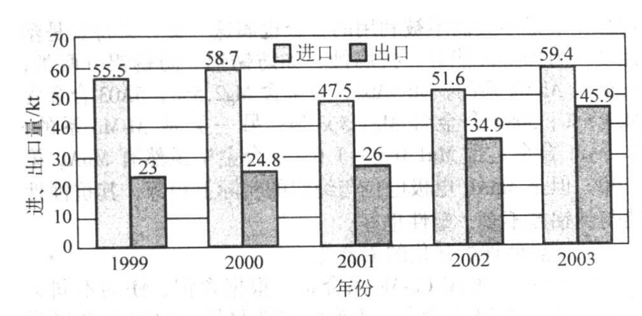


图 2.1-8 1999～2003 年我国铝箔进出口情况

箔净进口量持续下降，主要是我国铝箔生产增幅较大，出口增加之故，2002 年净进口铝箔量仅为 1.67 万吨。出口产品主要是食品包装箔，进口产品主要是烟箔、空调箔和电子箔等。

我国大型铝企业发展迅速，产量不断提高。2003 年，我国铝材生产企业年产 3 万吨以上的达到 25 家。前 5 位企业产量分别为：西南铝（18.7 万吨），辽宁铝业（10.35 万吨），河南明泰（7.10 万吨），渤海铝（6.32 万吨）和南平铝业（6.16 万吨）。

中国铝型材产量为 210 万吨。列于大型铝型材生产厂前 5 位的是：辽宁忠旺（10.35 万吨），广东凤铝（5.84 万吨），广东坚美（5.01 万吨），广东兴发（4.87 万吨）和台山金桥（4.16 万吨）。

铝箔生产总产量达到近 40 万吨，列于前 5 位的是：渤海铝 4.5 万吨，华北铝 3.6 万吨，常熟铝 3 万吨，西南铝 2.3 万吨及厦顺铝箔 2.3 万吨。

铝板产量达 80 万吨，铝带产量 30 万吨。铝板带主要生产大厂前 5 位有：西南铝 13.7 万吨，福建瑞闽 4.5 万吨，明泰铝业 3.2 万吨，东北轻合金 3.5 万吨和郑州铝业 3.2 万吨。

3 铝的性质及用途

3.1 铝的性质

工业上广泛使用的纯铝具有以下性质。

1）熔点低　熔点与纯度有关，99.996% 的铝其熔点为 660.37℃，99.97% 的铝为 659.8℃，熔炼、铸造、加工比较容易。

2）密度小　密度与温度和纯度有关，室温下纯度为 99.996% 铝的密度为 2 698.9 kg/m³，而纯度为 99.75% 的铝的密度为 2 703 kg/m³，约为铁的密度的 35%，可制造轻结构，有“会飞金属”之称。

3）可强化　纯铝强度不高，冷加工硬化能使强度提高一倍以上，当然塑性变低。可通过添加各种元素合金化（变成铝合金），使其强度提高，塑性下降不太大。有的铝合金还可通过热处理进一步强化，其比强度可与优质合金钢媲美。

4）塑性好，易加工　可轧成薄板和箔，拉成管材和细丝，挤成各种型材，锻造成各种零件，可高速进行车、铣、镗、刨等机械加工，无低温脆性。

5）抗腐蚀　铝表面上极易生成致密而牢固的氧化铝（Al_2O_3）薄膜，而且被破坏后会立即生成，保护铝不被腐蚀。因此，铝可在大气、普通水、多数酸和有机物中使用。

6）导热、导电性好　铝的导热、导电性仅次于金、银和铜。室温下电工铝的等体积电导率可达 62% IACS，若按单位质量导电能力计算，其导电能力为铜的 2 倍。其热导率（0～100℃）为 22.609 W/（m·K），电阻率（20 ℃）为 26.7 nΩ·m，电阻温度系数为 0.1（nΩ·m）·K^{-1}。

另外，还有无磁性、反射性强、有吸音性、耐核辐射和美观等特性。

3.2 铝的用途（消费结构）

由于铝有很多独特的优点，因此用途广泛。中国铝的消费量增加速度居世界首位（见表 2.1-3），消费结构变化也大，建筑行业占 30% 左右，交通运输占约 15%，机械行业占不到 9%，包装（包括易拉罐）占约 8.5%，电器与电力占不到 8% 等。日本是工业发达国家，年消费铝量接近 400 万吨，市场相当成熟，消费总量比较稳定，人均铝消费约为 30 kg/a，已处于世界领先地位，其消费结构有代表性。日本的铝消费结构见图 2.1-9。

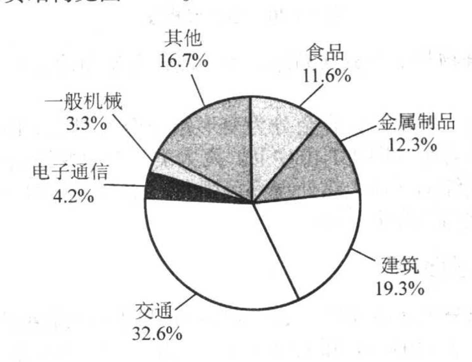


图 2.1-9 日本的铝消费结构

由图 2.1-9 可知，铝的消费主要在交通运输、建筑和包装业。很明显，汽车工业是最主要的铝消费领域。2001 年，日本整个交通运输业消费铝量为 130 万吨，其中汽车工业消费 120 万吨，占交通运输业总消费量的 93%。这些铝用于压铸件 59 万吨，普通铸件 35 万吨。交通运输业中另外的一个用铝大户是机车，铝材在高速列车和地铁中被广泛使用，主要是为了减轻质量。

建筑行业，日本在 2001 年用铝材达 75 万吨，包括门窗、装饰板和幕墙等。门窗用铝材占建筑行业用铝材的 70% 以上。

再有就是包装业用铝，如饮料罐。日本在 2001 年铝罐料用量达 44 万吨之多。食品包装箔、烟箔等消费也是大户。

中国已成为原铝生产大国，铝材生产大户，但是人均用铝量还很少。随着交通运输业、建筑业、食品包装业、家电和电子行业的迅猛发展，铝工业发展任重而道远。

4 铝及铝合金分类

4.1 根据相图分类

原铝在市场供应中统称为电解铝，是生产铝材及铝合金材的原料。铝是强度低、塑性好的金属，除应用部分纯铝外，为了提高强度或综合性能，配成合金。

根据铝及铝合金中所加元素多少，对性能影响情况，可借用相图给予大致的分类。铝中加入元素后，会形成如图 2.1-10 所示的相图。

铝中加入一种合金元素，就能使其组织结构和性能发生改变，适宜作各种加工材或铸造零件。经常加入的合金元素有铜、镁、锌、硅、锰等。这些合金元素在固态铝中的溶解度一般是有限的，而且随温度变化而变化。元素溶在铝中形成铝基固溶体（α），不溶在铝中的一般形成化合物（金属间化合物 β）。合金元素在固态铝中的溶解度，大多数情况下，随温度升高而增加，随温度降低而减小。可以利用加热冷却（退火、淬火和时效）使其性能改变，强度硬度提高（强化）。形成固溶体合金时，有利于压力加工和锻造。合金元

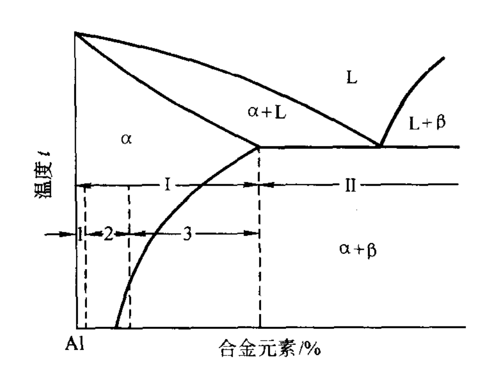


图 2.1-10　铝合金相图

素或化合物与铝形成共晶体，可以使合金流动性变好，有利于铸造。

因此，把铝及铝合金分为变形铝合金（图 2.1-10 中Ⅰ）和铸造铝合金（图 2.1-10 中Ⅱ）两大类。其中变形铝合金又分为工业纯铝（1）、热处理不可强化的铝合金（2）和热处理可强化的铝合金（3）。

4.2　工业纯铝

纯铝分工业高纯铝如 LG5（1A99）和普通工业纯铝如 L2（1060）、L3（1050A）和 L5-1（1100）等。高纯铝纯度高，含铝可达 99.85%～99.99%，其特点是传热导电性能和塑性变形能力好，有很好的抗腐蚀性能。普通工业纯铝，根据所含元素和杂质多少，分为很多牌号，性能有差异，可根据用途选用。含少量合金元素，对纯铝性能影响不大的铝合金也属此类。

4.3　变形铝合金

（1）热处理不可强化的铝合金

这类合金基本上是固溶体组织，有第二相也不多，不能通过淬火时效使其强化。就是含有比较多的合金元素，热处理强化效果不大而不被利用的合金也属这一类。其特点是塑性及压力加工性能好，抗腐蚀，如防锈铝。防锈铝分两类，一类是 Al-Mg 系的，如 5A02，合金含 Mg2.5%；5A03 合金含 Mg3.5%；5083 合金含 Mg4.5% 等；另一类是 Al-Mn 系的，如 3A21 合金，含 Mn1.0%～1.6%。合金中虽然有 $MnAl_6$ 第二相，但是 $MnAl_6$ 电极电位与纯铝的实际上相等，其抗蚀性能与纯铝差不多，塑性也好。

（2）热处理可强化的铝合金

1）硬铝　属 Al-Cu-Mg 系合金，根据含铜、镁的不同又分很多种，如 2A01 合金，生产铆钉线材用；2A02 合金属耐热硬铝，可在不高于 300℃下使用。2A11 合金为中等强度的硬铝。2A12 为硬铝中典型的合金，有良好的综合性能，强度高，有一定的耐热性。

2）锻铝　属 Al-Mg-Si-Cu 系。如 6A02 合金有中等强度，良好的塑性，在热态和冷态都易于成形。在人工时效状态下有轻微的晶间腐蚀倾向，但比同类的 2A50、2A14 等为小，还有好的可焊性。广泛应用于制造中等强度、大型结构件以及常温下工作的锻件。2A14 是锻铝中的典型合金，其特点是强度高，有好的热塑性，锻造性能好，还有较好的耐热性和可焊性。6061 具有中等强度，良好的塑性、可焊性和抗蚀性，可阳极氧化着色等，适于作建筑装饰材料。6063 有高塑性，可高速挤压成结构复杂、薄壁、中空的各种型材或锻造成结构复杂的锻件。热处理强化后有中等强度、高的冲击韧性，对缺口不敏感。

3）超硬铝　属 Al-Zn-Mg-Cu 系，其特点是强度高，热处理强化效果好。7A04 是历史悠久和应用广泛的超高强度合金。7A09 是飞机制造业应用较多的超高强度合金，它还有较好的低温强度。

目前，工业上普遍是按“变形铝及铝合金牌号表示方法”（GB/T 16474—1996），而不是按照上述分类方法介绍。

4.4　变形铝及铝合金的特点和用途

变形铝及铝合金的特点和用途见表 2.1-5。

表 2.1-5　变形铝及铝合金主要特点及用途举例

类　别	典型合金	主要特点	典型应用
工业纯铝	1060 1050A 1100	强度低，塑性高，易加工，导热导电率高，耐蚀性好，易焊接，可切削性能差	导电体，化工储存罐，反光板，炊具，焊条，热交换器，装饰材料
防锈铝	5A02 5083 5A03 3A21	不能热处理强化，退火状态塑性好，加工硬化后强度比工业纯铝高，耐蚀性能和焊接性能好，可切削性能较好	飞机油箱和导油管，船舶，化工设备，其他中等强度耐蚀、可焊零件。3A21 可作饮料罐
锻　铝	6A02 2A70 2A14 6061 6063	热状态下有高的塑性，易于锻造，淬火、人工时效后强度高，但有晶间腐蚀倾向。2A70 耐热性能好	航空、航海、交通、建筑方面要求中等强度的锻件或模锻件 2A70 用作耐热零件
硬　铝	2A01 2B11 2A11 2A12 2A16	退火、刚淬火状态下塑性尚好，有中等以上强度，耐蚀性能不高，可氩弧焊。2A12 为用量最大的合金，2A16 耐热	航空、交通工业中等以上强度的结构件，如飞机骨架、蒙皮等
超硬铝	7A04 7A09 7A10	强度高，退火或淬火状态下塑性尚可，耐蚀性能不好，特别是抗应力腐蚀性能差，硬状态可切削性能好	飞机上主受力件，如大梁、桁条、起落架等，其他工业中高强度结构件

5 变形铝及铝合金牌号表示方法 (GB/T 16474—1996)

(1) 牌号命名的基本原则

1) 国际四位数字体系牌号可直接引用。

2) 未命名为国际四位数字体系牌号的变形铝及铝合金，应采用四位字符牌号（但试验铝及铝合金采用前缀 X 加四位字符牌号）命名。

(2) 四位字符体系牌号命名方法

四位字符体系牌号的第一、三、四位为阿拉伯数字，第二位为英文大写字母（C、I、L、N、O、P、Q、Z 字母除外）。牌号的第一位数字表示铝及铝合金的组别，如表 2.1-6 所示。除改型合金外，铝合金组别按主要合金元素（6××× 系按 Mg_2Si）来确定。主要合金元素指极限含量算术平均值为最大的合金元素。当有两个或两个以上的合金元素极限含量算术平均值同为最大时，应按 Cu、Mn、Si、Mg、Mg_2Si、Zn、其他元素的顺序来确定合金组别。牌号的第二位字母表示原始纯铝或铝合金的改型情况，最后两位数字用以标识同一组中不同的铝合金或表示铝的纯度。

表 2.1-6 牌号组别及系列

组 别	牌号系列
纯铝（铝含量不小于 99.00%）	1×××
以铜为主要合金元素的铝合金	2×××
以锰为主要合金元素的铝合金	3×××
以硅为主要合金元素的铝合金	4×××
以镁为主要合金元素的铝合金	5×××
以镁和硅为主要合金元素并以 Mg_2Si 相为强化相的铝合金	6×××
以锌为主要合金元素的铝合金	7×××
以其他合金元素为主要合金元素的铝合金	8×××
备用合金组	9×××

1) 纯铝的牌号命名法　铝含量不低于 99.00% 时为纯铝，其牌号用 1××× 系列表示。牌号的最后两位数字表示最低铝百分含量。当最低铝百分含量精确到 0.01% 时，牌号的最后两位数字就是最低铝百分含量中小数点后面的两位。牌号第二位的字母表示原始纯铝的改型情况。如果第二位的字母为 A，则表示为原始纯铝；如果是 B ~ Y 的其他字母（按国际规定用字母表的次序选用），则表示为原始纯铝的改型，与原始纯铝相比，其元素含量略有改变。

2) 铝合金的牌号命名法　铝合金的牌号用 2××× ~ 8××× 系列表示。牌号的最后两位数字没有特殊意义，仅用来区分同一组中不同的铝合金。牌号第二位的字母表示原始合金的改型情况。如果牌号第二位的字母是 A，则表示为原始合金；如果是 B ~ Y 的其他字母（按国际规定用字母表的次序选用），则表示为原始合金的改型合金。改型合金与原始合金相比，化学成分的变化仅限于下列任何一种或几种情况：

① 一个合金元素或一组组合元素形式的合金元素，极限含量算术平均值的变化量符合表 2.1-7 的规定。

② 增加或删除了极限含量算术平均值不超过 0.30% 的一个合金元素；增加或删除了极限含量算术平均值不超过 0.40% 的一组组合元素形式的合金元素。

③ 为了同一目的，用一个合金元素代替了另一个合金元素。

④ 改变了杂质的极限含量。

⑤ 细化晶粒的元素含量有变化。

表 2.1-7 合金元素极限含量算术平均值范围与变化量

原始合金中的极限含量算术平均值范围/%	极限含量算术平均值的变化量不大于/%
≤1.2	0.15
>1.0 ~ 2.0	0.20
>2.0 ~ 3.0	0.25
>3.0 ~ 4.0	0.30
>4.0 ~ 5.0	0.35
>5.0 ~ 6.0	0.40
>6.0	0.50

注：改型合金中的组合元素极限含量的算术平均值，应与原始合金中相同组合元素的算术平均值或各相同元素（构成该组合元素的各单个元素）的算术平均值之和相比较。

6 变形铝及铝合金状态代号 (GB/T 16475—1996)

6.1 变形铝及铝合金状态代号

(1) 基本原则

1) 基础状态代号用一个英文大写字母表示。

2) 细分状态代号采用基础状态代号后跟一位或多位阿拉伯数字表示。

(2) 基础状态代号

基础状态分为 5 种，如表 2.1-8 所示。

表 2.1-8 基础状态代号

代号	名称	说明与应用
F	自由加工状态	适用于在成形过程中，对于加工硬化和热处理条件无特殊要求的产品，对该状态产品的力学性能不作规定
O	退火状态	适用于经完全退火获得最低强度的加工产品
H	加工硬化状态	适用于通过加工硬化提高强度的产品，产品在加工硬化后可经过（也可不经过）使强度有所降低的附加热处理。H 代号后面必须跟有两位或三位阿拉伯数字
W	固溶热处理状态	一种不稳定状态，仅适用于经固溶热处理后，室温下自然时效的合金，该状态代号仅表示产品处于自然时效阶段
T	热处理状态（不同于 F、O、H 状态）	适用于热处理后，经过（或不经过）加工硬化达到稳定状态的产品。 T 代号后面必须跟有一位或多位阿拉伯数字

(3) 细分状态代号

1) H 的细分状态　在字母 H 后面添加两位阿拉伯数字（称作 H×× 状态），或三位阿拉伯数字（称作 H××× 状态）表示 H 的细分状态。

① H×× 状态

a) H 后面的第 1 位数字表示获得该状态的基本处理程序，如下所示：

H1 表示单纯加工硬化状态。适用于未经附加热处理，

只经加工硬化即获得所需强度的状态。

H2 表示加工硬化及不完全退火的状态。适用于加工硬化程度超过成品规定要求后，经不完全退火，使强度降低到规定指标的产品。对于室温下自然时效软化的合金，H2 与对应的 H3 具有相同的最小极限抗拉强度值；对于其他合金，H2 与对应的 H1 具有相同的最小极限抗拉强度值，但伸长率比 H1 稍高。

H3 表示加工硬化及稳定化处理的状态。适用于加工硬化后经低温热处理或由于加工过程中的受热作用致使其力学性能达到稳定的产品。H3 状态仅适用于在室温下逐渐时效软化（除非经稳定化处理）的合金。

H4 表示加工硬化及涂漆处理的状态。适用于加工硬化后，经涂漆处理导致了不完全退火的产品。

b）H 后面的第 2 位数字表示产品的加工硬化程度。数字 8 表示硬状态。通常采用 O 状态的最小抗拉强度与表 2.1-9 规定的强度差值之和，来规定 H×8 状态的最小抗拉强度值。对于 O（退火）和 H×8 状态之间的状态，应在 H×代号后分别添加从 1 到 7 的数字来表示，在 H×后添加数字 9 表示比 H×8 加工硬化程度更大的超硬状态。各种 H××细分状态代号及对应的加工硬化程度如表 2.1-10 所示：

表 2.1-9　H×8 状态与 O 状态的最小抗拉强度差值

O 状态的最小抗拉强度/MPa	H×8 状态与 O 状态的最小抗拉强度差值/MPa
≤40	55
45～60	65
65～80	75
85～100	85
105～120	90
125～160	95
165～200	100
205～240	105
245～280	110
285～320	115
≥325	120

表 2.1-10　H××细分状态代号与加工硬化程度

细分状态代号	加工硬化程度
H×1	抗拉强度极限为 O 与 H×2 状态的中间值
H×2	抗拉强度极限为 O 与 H×4 状态的中间值
H×3	抗拉强度极限为 H×2 与 H×4 状态的中间值
H×4	抗拉强度极限为 O 与 H×8 状态的中间值
H×5	抗拉强度极限为 H×4 与 H×6 状态的中间值
H×6	抗拉强度极限为 H×4 与 H×8 状态的中间值
H×7	抗拉强度极限为 H×6 与 H×8 状态的中间值
H×8	硬状态
H×9	超硬状态。最小抗拉强度极限值超 H×8 状态至少 10 MPa

注：当按表 2.1-10 确定的 H×1～H×9 状态的抗拉强度极限值，不是以 0 或 5 结尾时，应修约至以 0 或 5 结尾的相邻较大值。

② H×××状态　H×××状态代号如下所示：

a）H111　适用于最终退火后又进行了适量的加工硬化，但加工硬化程度又不及 H11 状态的产品。

b）H112　适用于热加工成形的产品。该状态产品的力学性能有规定要求。

c）H116　适用于镁含量≥4.0%的 5×××系合金制成的产品。这些产品具有规定的力学性能和抗剥落腐蚀性能要求。

d）花纹板的状态代号（略）。

2）T 的细分状态　在字母 T 后面添加一位或多位阿拉伯数字表示 T 的细分状态。

① T×状态　在 T 后面添加 0～10 的阿拉伯数字，表示的细分状态（称作 T×状态）如表 2.1-11 所示。T 后面的数字表示对产品的基本处理程序。

表 2.1-11　T×细分状态代号说明与应用

状态代号	说　明　与　应　用
T0	固溶热处理后，经自然时效再通过冷加工的状态。适用于经冷加工提高强度的产品
T1	由高温成形过程冷却，然后自然时效至基本稳定的状态。适用于由高温成形过程冷却后，不再进行冷加工（可进行矫直、矫平，但不影响力学性能极限）的产品
T2	由高温成形过程冷却，经冷加工后自然时效至基本稳定的状态。适用于由高温成形过程冷却后，进行冷加工或矫直、矫平以提高强度的产品
T3	固溶热处理后进行冷加工，再经自然时效至基本稳定的状态。适用于在固溶热处理后，进行冷加工或矫直、矫平以提高强度的产品
T4	固溶热处理后自然时效至基本稳定的状态。适用于固溶热处理后，不再进行冷加工（可进行矫直、矫平，但不影响力学性能极限）的产品
T5	由高温成形过程冷却，然后进行人工时效的状态。适用于由高温成形过程冷却后，不经过冷加工（可进行矫直、矫平，但不影响力学性能极限），予以人工时效的产品
T6	固溶热处理后进行人工时效的状态。适用于固溶热处理后，不再进行冷加工（可进行矫直、矫平，但不影响力学性能极限）的产品
T7	固溶热处理后进行过时效的状态。适用于固溶热处理后，为获取某些重要特性，在人工时效时，强度在时效曲线上越过了最高峰点的产品
T8	固溶热处理后经冷加工，然后进行人工时效的状态。适用于经冷加工或矫直、矫平以提高强度的产品
T9	固溶热处理后人工时效，然后进行冷加工的状态。适用于经冷加工提高强度的产品
T10	由高温成形过程冷却后，进行冷加工，然后人工时效的状态。适用于经冷加工或矫直、矫平以提高强度的产品

注：某些 6×××系的合金，无论是炉内固溶热处理，还是从高温成形过程急冷以保留可溶性组分在固溶体中，均能达到相同的固溶热处理效果，这些合金的 T3、T4、T6、T7、T8 和 T9 状态可采用上述处理方法的任一种。

② T××状态及T×××状态（消除应力状态除外） 在T×状态代号后面再添加一位阿拉伯数字（称作T××状态），或添加两位阿拉伯数字（称作T×××状态），表示经过了明显改变产品特性（如力学性能、抗腐蚀性能等）的特定工艺处理的状态，如表2.1-12所示。

③ 消除应力状态 在上述T×或T××或T×××状态代号后面添加“51”、或“510”、或“511”、或“52”、或“54”表示经历了消除应力处理的产品状态代号，如表2.1-13所示。

3) W的消除应力状态 正如T的消除应力状态代号表示方法，可在W状态代号后面添加相同的数字（如51、52、54），以表示不稳定的固溶热处理及消除应力状态。

表2.1-12 T××及T×××细分状态代号说明与应用

状态代号	说明与应用
T42	适用于自O或F状态固溶热处理后，自然时效到充分稳定状态的产品，也适用于需方对任何状态的加工产品热处理后，力学性能达到了T42状态的产品
T62	适用于自O或F状态固溶热处理后，进行人工时效的产品，也适用于需方对任何状态的加工产品热处理后，力学性能达到了T62状态的产品
T73	适用于固溶热处理后，经过时效以达到规定的力学性能和抗应力腐蚀性能指标的产品
T74	与T73状态定义相同。该状态的抗拉强度大于T73状态，但小于T76状态
T76	与T73状态定义相同。该状态的抗拉强度分别高于T73、T74状态，抗应力腐蚀断裂性能分别低于T73、T74状态，但其抗剥落腐蚀性能仍较好
T7×2	适用于自O或F状态固溶热处理后，进行人工过时效处理，力学性能及抗腐蚀性能达到了T7×状态的产品
T81	适用于固溶热处理后，经1%左右的冷加工变形提高强度，然后进行人工时效的产品
T87	适用于固溶热处理后，经7%左右的冷加工变形提高强度，然后进行人工时效的产品

表2.1-13 消除应力状态代号说明与应用

状态代号	说明与应用
T×51 T××51 T×××51	适用于固溶热处理或自高温成形过程冷却后，按规定量进行拉伸的厚板、轧制或冷精整的棒材以及模锻件、锻环或轧制环，这些产品拉伸后不再进行矫直 厚板的永久变形量为1.5%～3%；轧制或冷精整棒材的永久变形量为1%～3%；模锻件、锻环或轧制环的永久变形量为1%～5%
T×510 T××510 T×××510	适用于固溶热处理或自高温成形过程冷却后，按规定量进行拉伸的挤制棒、型材和管材，以及拉制管材，这些产品拉伸后不再进行矫直 挤制棒、型和管材的永久变形量为1%～3%；拉制管材的永久变形量为1.5%～3%
T×511 T××511 T×××511	适用于固溶热处理或自高温成形过程冷却后，按规定量进行拉伸的挤制棒、型材和管材，以及拉制管材，这些产品拉伸后可略微矫直以符合标准公差 挤制棒、型材和管材的永久变形量为1%～3%；拉制管材的永久变形量为1.5%～3%
T×52 T××52 T×××52	适用于固溶热处理或自高温成形过程冷却后，通过压缩来消除应力，以产生1%～5%永久变形量的产品
T×54 T××54 T×××54	适用于在终锻模内通过冷整形来消除应力的模锻件

6.2 原状态代号与新状态代号对照（表2.1-14）

表2.1-14 原状态代号与新状态代号对照

原代号	新代号	原代号	新代号
M	O	CYS	T×51、T×52等
R	H112或F	CZY	T0
Y	H×8	CSY	T9
Y1	H×6	MCS	T62
Y2	H×4	MCZ	T42
Y4	H×2	CGS1	T73
T	H×9	CGS2	T76
CZ	T4	CGS3	T74
CS	T6	RCS	T5

注：原以R状态交货的、提供CZ、CS试样性能的产品，其状态可分别对应新代号T62、T42。

7 铝及铝合金化学成分

7.1 合金元素和杂质

常用合金元素主要有铜、镁、锌、锰、锂和硅等。

铜是铝合金基本合金元素之一。含铜的铝合金经淬火和时效可以强化，含Cu4%～6%的铝合金强化效果最大。但二元Al-Cu合金工业价值不大，必须有其他合金元素配合。如硬铝2A12，除含Cu3.8%～4.9%外，还含Mg1.2%～1.8%和Mn0.30%～0.9%等。

向3A21合金中加Cu0.005%～0.20%，可使它由点腐蚀变为均匀腐蚀。虽然腐蚀损失量有所增加，但延长了产品使用期限。向Al-Zn-Mg系合金加一定量的Cu，能明显降低其应力腐蚀开裂倾向。

少量Cu混入作包覆材料用的合金，会改变其阳极电位，失去应有的保护作用，因此应限制Cu含量于0.015%以下。

二元 Al-Zn 合金没有工业价值。加有其他元素（如镁）的 Al-Zn-Mg 合金有良好的综合性能，可淬火时效强化，成为超硬铝，如 7A04，7A09 合金。也有铸造的 Al-Zn-Mg 合金。

锌能提高铝的溶解电位，作包覆材料的铝合金和牺牲阳极合金中都含有一定量的锌。

6063 合金中，Zn 含量大于 0.02% 时，其挤压产品在碱洗过程中会出现变化无常的“闪烁”斑痕。

镁是除 3A21 合金以外的各种防锈铝的主要合金元素。变形镁合金的含镁量小于 5.5%，铸造 Al-Mg 合金中含镁量为 4% ~ 10%。合金中沿晶界存在的阳极相（Mg_5Al_8），会使合金具有穿晶断裂和应力腐蚀敏感性。加锰能使含镁相分布均匀，提高强度、抗蚀性和可焊性。

含锂的铝合金的突出特点是密度小，弹性模量大，比强度和比刚度好，可通过淬火和时效提高强度和硬度。配合其他元素(如 Cu 和 Zr)形成的 2090 合金(Al2.2Li2.7Cu0.12Zr)，其强度超过 700 MPa，跻身最高强度铝合金之列。

锰是防锈铝如 3A21 的基本合金元素，锰既能提高合金的力学性能，又不使合金抗蚀性下降，还能保持合金有较好的塑性。3×××系合金大量加工成用于易拉罐和厨房用具的板材。

锰能使铝合金中针状或片状含 Fe 化合物改变形状，并降低其脆性。锰还是其他铝合金常用的少量合金元素，它既能提高强度，又能提高再结晶温度，阻碍晶粒长大。

锆在铝合金中的含量一般为 0.1% ~ 0.3%，形成细小的金属间化合物质点，抑制恢复和再结晶。锆也是细化铸造组织（晶粒）的素元，其效果不如 Ti。Zr 可降低 AlTiB 晶粒细化效果，含 Zr 的铝合金，用 AlTiB 作细化剂，应多加些。

铸造铝合金中硅是主要合金元素，因为 Al-Si 合金流动性能和铸造性能好。特殊铝 4A13、4A17 中含 Si 量为 7.5% 和 12%，可作钎焊铝的包覆层。

向铝合金中添加 Mg 和 Si（均不大于 1.5%），能形成淬火和时效时有强化作用的 Mg_2Si 相，从而形成了 6×××系有广泛用途的锻铝，如 6061 和 6063，是建筑主要用材。

在大多数铝合金中，Si 和 Fe 都属于受控制的杂质。有它们存在，合金塑性下降，对断裂韧度有害，还影响压力加工和铸造性能。

还有些有用元素，如 Ni、Cr 等。所谓合金元素，按 GB/T 8005 规定是指，为使金属具有某种特性，在基体金属中有意加入或保留的金属或非金属元素。当然，相对应的就是杂质。按同一个标准规定，杂质是存在于金属中的但并非有意加入或保留的金属元素或非金属元素。对一种合金来讲是合金元素，对另一种合金则可能是受控制的杂质。杂质一般存在数量较少，在具体合金中都有规定。杂质并非都是有害的，如铝合金中杂质锰在某方面可能还有好处；多数杂质应避免，有的甚至绝对不允许存在。

7.2　变形铝及铝合金化学成分（GB/T 3190—1996）

变形铝及铝合金化学成分见表 2.1-15。原牌号与新牌号对照表见 2.1-16。

表 2.1-15　变形铝及铝合金化学成分表（摘自 GB/T 3190—1996）

序号	牌号	化学成分 /%														备注
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn		Ti	Zr	其他 单个	其他 合计	Al	
1	1A99	0.003	0.003	0.005	—	—	—	—	—	—	—	—	0.002	—	99.99	LG5
2	1A97	0.015	0.015	0.005	—	—	—	—	—	—	—	—	0.005	—	99.97	LG4
3	1A95	0.030	0.030	0.010	—	—	—	—	—	—	—	—	0.005	—	99.95	—
4	1A93	0.040	0.040	0.010	—	—	—	—	—	—	—	—	0.007	—	99.93	LG3
5	1A90	0.060	0.060	0.010	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01	—	99.90	LG2
6	1A85	0.08	0.10	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01	—	99.85	LG1
7	1A80	0.15	0.15	0.03	0.02	0.02	—	—	0.03	Ca：0.03；V：0.05	0.03	—	0.02	—	99.80	—
8	180A	0.15	0.15	0.03	0.02	0.02	—	—	0.06	Ca：0.03	0.02	—	0.02	—	99.80	—
9	1070	0.20	0.25	0.04	0.03	0.03	—	—	0.04	V：0.05	0.03	—	0.03	—	99.70	—
10	1070A	0.20	0.25	0.03	0.03	0.03	—	—	0.07	—	0.03	—	0.03	—	99.70	L1
11	1370	0.10	0.25	0.02	0.01	0.02	0.01	—	0.04	Ca:0.03;V+Ti:0.02 B:0.02	—	—	0.02	0.10	99.70	—
12	1060	0.25	0.35	0.05	0.03	0.03	—	—	0.05	V：0.05	0.03	—	0.03	—	99.60	L2
13	1050	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	—	—	0.05	V：0.05	0.03	—	0.03	—	99.50	—
14	1050A	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	—	—	0.07	—	0.05	—	0.03	—	99.50	—
15	1A50	0.30	0.30	0.01	0.05	0.05	—	—	0.03	Fe+Si：0.45	—	—	0.03	—	99.50	LB2
16	1350	0.10	0.40	0.05	0.01	—	0.01	—	0.05	Ca:0.03;V+Ti:0.02 B:0.05	—	—	0.03	0.10	99.50	—
17	1145	Si+Fe：0.55		0.05	0.05	0.05	—	—	0.05	V：0.05	0.03	—	0.03	—	99.45	—
18	1035	0.35	0.6	0.10	0.05	0.05	—	—	0.10	V：0.05	0.03	—	0.03	—	99.35	L4
19	1A30	0.10~0.20	0.15~0.30	0.05	0.01	0.01	—	0.01	0.02	—	0.02	—	0.03	—	99.30	L4-1

续表 2.1-15

序号	牌号	化学成分/%														备注
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn		Ti	Zr	其他		Al	
													单个	合计		
20	1100	Si + Fe：0.95		0.05 ~ 0.20	0.05	—	—	—	0.10	①	—	—	0.05	0.15	99.00	L5-1
21	1200	Si + Fe：1.00		0.05	0.05	—	—	—	0.10	—	0.05	—	0.05	0.15	99.00	L5
22	1235	Si + Fe：0.65		0.05	0.05	0.05	—	—	0.10	V：0.05	0.06	—	0.03	—	99.35	—
23	2A01	0.50	0.50	2.2 ~ 3.0	0.20	0.20 ~ 0.50	—	—	0.10	—	0.15	—	0.05	0.10	余量	LY1
24	2A02	0.30	0.30	2.6 ~ 3.2	0.45 ~ 0.7	2.0 ~ 2.4	—	—	0.10	—	0.15	—	0.05	0.6	余量	LY2
25	2A04	0.30	0.30	3.2 ~ 3.7	0.50 ~ 0.8	2.1 ~ 2.6	—	—	0.10	Be：0.001 ~ 0.01②	0.05 ~ 0.40	—	0.05	0.10	余量	LY4
26	2A06	0.50	0.50	3.8 ~ 4.3	0.50 ~ 1.0	1.7 ~ 2.3	—	—	0.10	Be：0.001 ~ 0.005②	0.03 ~ 0.15	—	0.05	0.10	余量	LY6
27	2A10	0.25	0.20	3.9 ~ 4.5	0.30 ~ 0.50	0.15 ~ 0.30	—	—	0.10	—	0.15	—	0.05	0.10	余量	LY10
28	2A11	0.7	0.7	3.8 ~ 4.8	0.40 ~ 0.8	0.40 ~ 0.8	—	0.10	0.30	Fe + Ni：0.7	0.15	—	0.05	0.10	余量	LY11
29	2B11	0.50	0.50	3.8 ~ 4.5	0.40 ~ 0.8	0.40 ~ 0.8	—	—	0.10	—	0.15	—	0.05	0.10	余量	LY8
30	2A12	0.50	0.50	3.8 ~ 4.9	0.30 ~ 0.9	1.2 ~ 1.8	—	0.10	0.30	Fe + Ni：0.50	0.15	—	0.05	0.10	余量	LY12
31	2B12	0.50	0.50	3.8 ~ 4.5	0.30 ~ 0.7	1.2 ~ 1.6	—	—	0.10	—	0.15	—	0.05	0.10	余量	LY9
32	2A13	0.7	0.6	4.0 ~ 5.0	—	0.30 ~ 0.50	—	—	0.6	—	0.15	—	0.05	0.10	余量	LY13
33	2A14	0.6 ~ 1.2	0.7	3.9 ~ 4.8	0.40 ~ 1.0	0.40 ~ 0.8	—	0.10	0.30	—	0.15	—	0.05	0.10	余量	LD10
34	2A16	0.30	0.30	6.0 ~ 7.0	0.40 ~ 0.8	0.05	—	—	0.10	—	0.10 ~ 0.20	0.20	0.05	0.10	余量	LY16
35	2B16	0.25	0.30	5.8 ~ 6.8	0.20 ~ 0.40	0.05	—	—	—	V：0.05 ~ 0.15	0.08 ~ 0.20	0.10 ~ 0.25	0.05	0.10	余量	LY16-1
36	2A17	0.30	0.30	6.0 ~ 7.0	0.40 ~ 0.8	0.25 ~ 0.45	—	—	0.10	—	0.10 ~ 0.20	—	0.05	0.10	余量	LY17
37	2A20	0.20	0.30	5.8 ~ 6.8	—	0.02	—	—	0.10	V：0.05 ~ 0.15 B：0.001 ~ 0.01	0.07 ~ 0.16	0.10 ~ 0.25	0.05	0.15	余量	LY20
38	2A21	0.20	0.20 ~ 0.6	3.0 ~ 4.0	0.05	0.8 ~ 1.2	—	1.8 ~ 2.3	0.20	—	0.05	—	0.05	0.15	余量	—
39	2A25	0.06	0.06	3.6 ~ 4.2	0.50 ~ 0.7	1.0 ~ 1.5	—	0.06	—	—	—	—	0.05	0.10	余量	—
40	2A49	0.25	0.8 ~ 1.2	3.2 ~ 3.8	0.30 ~ 0.6	1.8 ~ 2.2	—	0.8 ~ 1.2	—	—	0.08 ~ 0.12	—	0.05	0.15	余量	—
41	2A50	0.7 ~ 1.2	0.7	1.8 ~ 2.6	0.40 ~ 0.8	0.40 ~ 0.8	—	0.10	0.30	Fe + Ni：0.7	0.15	—	0.05	0.10	余量	LD5
42	2B50	0.7 ~ 1.2	0.7	1.8 ~ 2.6	0.40 ~ 0.8	0.40 ~ 0.8	0.01 ~ 0.20	0.10	0.30	Fe + Ni：0.7	0.02 ~ 0.10	—	0.05	0.10	余量	LD6
43	2A70	0.35	0.9 ~ 1.5	1.9 ~ 2.5	0.20	1.4 ~ 1.8	—	0.9 ~ 1.5	0.30	—	0.02 ~ 0.10	—	0.05	0.10	余量	LD7

续表 2.1-15

序号	牌号	化学成分/%														备注
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn		Ti	Zr	其他		Al	
													单个	合计		
44	2B70	0.25	0.9~1.4	1.8~2.7	0.20	1.2~1.8	—	0.8~1.4	0.15	Pb：0.05；Sn：0.05 Ti+Zr：0.20	0.10	—	0.05	0.15	余量	—
45	2A80	0.50~1.2	1.0~1.6	1.9~2.5	0.20	1.4~1.8	—	0.9~1.5	0.30	—	0.15	—	0.05	0.10	余量	LD8
46	2A90	0.50~1.0	0.50~1.0	3.5~4.5	0.20	0.40~0.8	—	1.8~2.3	0.30	—	0.15	—	0.05	0.10	余量	LD9
47	2004	0.20	0.20	5.5~6.5	0.10	0.50	—	—	0.10	—	0.05	0.30~0.50	0.05	0.15	余量	—
48	2011	0.40	0.7	5.0~6.0	—	—	—	—	0.30	Bi：0.20~0.6 Pb：0.20~0.6	—	—	0.05	0.15	余量	—
49	2014	0.50~1.2	0.7	3.9~5.0	0.40~1.2	0.20~0.8	0.10	—	0.25	③	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
50	2014A	0.50~0.9	0.50	3.9~5.0	0.40~1.2	0.20~0.8	0.10	0.10	0.25	Ti+Zr：0.20	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
51	2214	0.50~1.2	0.30	3.9~5.0	0.40~1.2	0.20~0.8	0.10	—	0.25	③	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
52	2017	0.20~0.8	0.7	3.5~4.5	0.40~1.0	0.40~0.8	0.10	—	0.25	③	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
53	2017A	0.20~0.8	0.7	3.5~4.5	0.40~1.0	0.40~1.0	0.10	—	0.25	Ti+Zr：0.25	—	—	0.05	0.15	余量	—
54	2117	0.8	0.7	2.2~3.0	0.20	0.20~0.50	0.10	—	0.25	—	—	—	0.05	0.15	余量	—
55	2218	0.9	1.0	3.5~4.5	0.20	1.2~1.8	0.10	1.7~2.3	0.25	—	—	—	0.05	0.15	余量	—
56	2618	0.10~0.25	0.9~1.3	1.9~2.7	—	1.3~1.8	—	0.9~1.2	0.10	—	0.04~0.10	—	0.05	0.15	余量	—
57	2219	0.20	0.30	5.8~6.8	0.20~0.40	0.02	—	—	0.10	V：0.05~0.15	0.20~0.10	0.10~0.25	0.05	0.15	余量	LY19
58	2024	0.50	0.50	3.8~4.9	0.30~0.9	1.2~1.8	0.10	—	0.25	③	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
59	2124	0.20	0.30	3.8~4.9	0.30~0.9	1.2~1.8	0.10	—	0.25	③	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
60	3A21	0.6	0.7	0.20	1.0~1.6	0.05	—	—	0.10④	—	0.15	—	0.05	0.10	余量	LF21
61	3003	0.6	0.7	0.05~0.20	1.0~1.5	—	—	—	0.10	—	—	—	0.05	0.15	余量	—
62	3103	0.50	0.7	0.10	0.9~1.5	0.30	0.10	—	0.20	Ti+Zr：0.10	—	—	0.05	0.15	余量	—
63	3004	0.30	0.7	0.25	1.0~1.5	0.8~1.3	—	—	0.25	—	—	—	0.05	0.15	余量	—
64	3005	0.6	0.7	0.30	1.0~1.5	0.20~0.6	0.10	—	0.25	—	0.10	—	0.05	0.15	余量	—
65	3105	0.6	0.7	0.30	0.30~0.8	0.20~0.8	0.20	—	0.40	—	0.10	—	0.05	0.15	余量	—
66	4A01	4.5~6.0	0.6	0.20	—	—	—	—	Zn+Sn：0.10	—	0.15	—	0.05	0.15	余量	LT1

续表 2.1-15

序号	牌号	化学成分 /%											其他			备注
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn		Ti	Zr	单个	合计	Al	
67	4A11	11.5~13.5	1.0	0.50~1.3	0.20	0.8~1.3	0.10	0.50~1.3	0.25	—	0.15	—	0.05	0.15	余量	LD11
68	4A13	6.8~8.2	0.50	Cu+Zn: 0.15	0.50	0.05	—	—	—	Ca：0.10	0.15	—	0.05	0.15	余量	LT13
69	4A17	11.0~12.5	0.50	Cu+Zn: 0.15	0.50	0.05	—	—	—	Ca：0.10	0.15	—	0.05	0.15	余量	LT17
70	4004	9.0~10.5	0.8	0.25	0.10	1.0~2.0	—	—	0.20	—	—	—	0.05	0.15	余量	—
71	4032	11.0~13.5	1.0	0.50~1.3	—	0.8~1.3	0.10	0.50~1.3	0.25	—	—	—	0.05	0.15	余量	—
72	4043	4.5~6.0	0.8	0.30	0.05	0.05	—	—	0.10	①	0.20	—	0.05	0.15	余量	—
73	4043A	4.5~6.0	0.6	0.30	0.15	0.20	—	—	0.10	①	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
74	4047	11.0~13.0	0.8	0.30	0.15	0.10	—	—	0.20	①	—	—	0.05	0.15	余量	—
75	4047A	11.0~13.0	0.6	0.30	0.15	0.10	—	—	0.20	①	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
76	5A01	Si+Fe：0.40		0.10	0.30~0.7	6.0~7.0	0.10~0.20	—	0.25	—	0.15	0.10~0.20	0.05	0.15	余量	LF15
77	5A02	0.40	0.40	0.10	或 Cr 0.15~0.40	2.0~2.8	—	—	—	Si+Fe：0.6	0.15	—	0.05	0.15	余量	LF2
78	5A03	0.50~0.8	0.50	0.10	0.30~0.6	3.2~3.8	—	—	0.20	—	0.15	—	0.05	0.10	余量	LF3
79	5A05	0.50	0.50	0.10	0.30~0.6	4.8~5.5	—	—	0.20	—	—	—	0.05	0.10	余量	LF5
80	5B05	0.40	0.40	0.20	0.20~0.6	4.7~5.7	—	—	—	Si+Fe：0.6	0.15	—	0.05	0.10	余量	LF10
81	5A06	0.40	0.40	0.10	0.50~0.8	5.8~6.8	—	—	0.20	Be：0.0001~0.005②	0.02~0.10	—	0.05	0.10	余量	LF6
82	5B06	0.40	0.40	0.10	0.50~0.8	5.8~6.8	—	—	0.20	Be：0.0001~0.005②	0.10~0.30	—	0.05	0.10	余量	LF14
83	5A12	0.30	0.30	0.05	0.40~0.8	8.3~9.6	—	0.10	0.20	Be：0.005 Sb：0.004~0.05	0.05~0.15	—	0.05	0.10	余量	LF12
84	5A13	0.30	0.30	0.05	0.40~0.8	9.2~10.5	—	0.10	0.20	Be：0.005 Sb：0.004~0.05	0.05~0.15	—	0.05	0.10	余量	LF13
85	5A30	Si+Fe：0.40		0.10	0.50~1.0	4.7~5.5	—	—	0.25	Cr：0.05~0.20	0.03~0.15	—	0.05	0.10	余量	LF16
86	5A33	0.35	0.35	0.10	0.10	6.0~7.5	—	—	0.50~1.5	Be：0.0005~0.005②	0.05~0.15	0.10~0.30	0.05	0.10	余量	LF33
87	5A41	0.40	0.40	0.10	0.30~0.6	6.0~7.0	—	—	0.20	—	0.02~0.10	—	0.05	0.10	余量	LT41
88	5A43	0.40	0.40	0.10	0.15~0.40	0.6~1.4	—	—	—	—	0.15	—	0.05	0.15	余量	LF43
89	5A66	0.005	0.01	0.005	—	1.5~2.0	—	—	—	—	—	—	0.005	0.01	余量	LT66

续表 2.1-15

序号	牌号	化学成分/%											其他		Al	备注
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn		Ti	Zr	单个	合计		
90	5005	0.30	0.7	0.20	0.20	0.50~1.1	0.10	—	0.25	—	—	—	0.05	0.15	余量	—
91	5019	0.40	0.50	0.10	0.10~0.6	4.5~5.6	0.20	—	0.20	Mn+Cr：0.10~0.6	0.20	—	0.05	0.15	余量	—
92	5050	0.40	0.7	0.20	0.10	1.1~1.8	0.10	—	0.25	—	—	—	0.05	0.15	余量	—
93	5251	0.40	0.50	0.15	0.10~0.50	1.7~2.4	0.15	—	0.15	—	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
94	5052	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2~2.8	0.15~0.35	—	0.10	—	—	—	0.05	0.15	余量	—
95	5154	0.25	0.40	0.10	0.10	3.1~3.9	0.15~0.35	—	0.20	①	0.20	—	0.05	0.15	余量	—
96	5154A	0.50	0.50	0.10	0.50	3.1~3.9	0.25	—	0.20	① Mn+Cr：0.10~0.50	0.20	—	0.05	0.15	余量	—
97	5454	0.25	0.40	0.10	0.50~1.0	2.4~3.0	0.05~0.20	—	0.25	—	0.20	—	0.05	0.15	余量	—
98	5554	0.25	0.40	0.10	0.50~1.0	2.4~3.0	0.05~0.20	—	0.25	①	0.05~0.20	—	0.05	0.15	余量	—
99	5754	0.40	0.40	0.10	0.50	2.6~3.6	0.30	—	0.20	Mn+Cr：0.10~0.6	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
100	5056	0.30	0.40	0.10	0.05~0.20	4.5~5.6	0.05~0.20	—	0.10	—	—	—	0.05	0.15	余量	LF5-1
101	5356	0.25	0.40	0.10	0.05~0.20	4.5~5.5	0.05~0.20	—	0.10	①	0.06~0.20	—	0.05	0.15	余量	—
102	5456	0.25	0.40	0.10	0.50~1.0	4.7~5.5	0.05~0.20	—	0.25	—	0.20	—	0.05	0.15	余量	—
103	5082	0.20	0.35	0.15	0.15	4.0~5.0	0.15	—	0.25	—	0.10	—	0.05	0.15	余量	—
104	5182	0.20	0.35	0.15	0.20~0.50	4.0~5.0	0.10	—	0.25	—	0.10	—	0.05	0.15	余量	—
105	5083	0.40	0.40	0.10	0.40~1.0	4.0~4.9	0.05~0.25	—	0.25	—	0.15	—	0.05	0.15	余量	LF4
106	5183	0.40	0.40	0.10	0.50~1.0	4.3~5.2	0.05~0.25	—	0.25	①	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
107	5086	0.40	0.50	0.10	0.20~0.7	3.5~4.5	0.05~0.25	—	0.25	—	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
108	6A02	0.50~1.2	0.50	0.20~0.6	或Cr 0.15~0.35	0.45~0.9	—	—	0.20	—	0.15	—	0.05	0.10	余量	LD2
109	6B02	0.7~1.1	0.40	0.10~0.40	0.10~0.30	0.40~0.8	—	—	0.15	—	0.01~0.04	—	0.05	0.10	余量	LD2-1
110	6A51	0.50~0.7	0.50	0.15~0.35	—	0.45~0.6	—	—	0.25	Sn：0.15~0.35	0.01~0.04	—	0.05	0.15	余量	—
111	6101	0.30~0.7	0.50	0.10	0.03	0.35~0.8	0.03	—	0.10	B：0.06	—	—	0.03	0.10	余量	—
112	6101A	0.30~0.7	0.40	0.05	—	0.40~0.9	—	—	—	—	—	—	0.03	0.10	余量	—

续表 2.1-15

序号	牌号	化学成分 /%											其他		Al	备注
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn		Ti	Zr	单个	合计		
113	6005	0.6 ~ 0.9	0.35	0.10	0.10	0.40 ~ 0.6	0.10	—	0.10	—	0.10	—	0.05	0.15	余量	—
114	6005A	0.50 ~ 0.9	0.35	0.30	0.50	0.40 ~ 0.7	0.30	—	0.20	Mn + Cr：0.12 ~ 0.50	0.10	—	0.05	0.15	余量	—
115	6351	0.7 ~ 1.3	0.50	0.10	0.40 ~ 0.8	0.40 ~ 0.8	—	—	0.20	—	0.20	—	0.05	0.15	余量	—
116	6060	0.30 ~ 0.6	0.10 ~ 0.30	0.10	0.10	0.35 ~ 0.6	0.05	—	0.15	—	0.10	—	0.05	0.15	余量	—
117	6061	0.40 ~ 0.8	0.7	0.15 ~ 0.40	0.15	0.8 ~ 1.2	0.04 ~ 0.35	—	0.25	—	0.15	—	0.05	0.15	余量	LD30
118	6063	0.20 ~ 0.6	0.35	0.10	0.10	0.45 ~ 0.9	0.10	—	0.10	—	0.10	—	0.05	0.15	余量	LD31
119	6063A	0.30 ~ 0.6	0.15 ~ 0.35	0.10	0.15	0.6 ~ 0.9	0.05	—	0.15	—	0.10	—	0.05	0.15	余量	—
120	6070	1.0 ~ 1.7	0.50	0.15 ~ 0.40	0.40 ~ 1.0	0.50 ~ 1.2	0.10	—	0.25	—	0.15	—	0.05	0.15	余量	LD2-2
121	6181	0.8 ~ 1.2	0.45	0.10	0.15	0.6 ~ 1.0	0.10	—	0.20	—	0.10	—	0.05	0.15	余量	—
122	6082	0.7 ~ 1.3	0.50	0.10	0.40 ~ 1.0	0.6 ~ 1.2	0.25	—	0.20	—	0.10	—	0.05	0.15	余量	—
123	7A01	0.30	0.30	0.01	—	—	—	—	0.9 ~ 1.3	Si + Fe：0.45	—	—	0.03	—	余量	LB1
124	7A03	0.20	0.20	1.8 ~ 2.4	0.10	1.2 ~ 1.6	0.05	—	6.0 ~ 6.7	—	0.02 ~ 0.08	—	0.05	0.10	余量	LC3
125	7A04	0.50	0.50	1.4 ~ 2.0	0.20 ~ 0.6	1.8 ~ 2.8	0.10 ~ 0.25	—	5.0 ~ 7.0	—	0.10	—	0.05	0.10	余量	LC4
126	7A05	0.25	0.25	0.20	0.15 ~ 0.40	1.1 ~ 1.7	0.05 0.15	—	4.4 ~ 5.0	—	0.02 ~ 0.06	0.10 ~ 0.25	0.05	0.15	余量	—
127	7A09	0.50	0.50	1.2 ~ 2.0	0.15	2.0 ~ 3.0	0.16 ~ 0.30	—	5.1 ~ 6.1	—	0.10	—	0.05	0.10	余量	LC9
128	7A10	0.30	0.30	0.50 ~ 1.0	0.20 ~ 0.35	3.0 ~ 4.0	0.10 ~ 0.20	—	3.2 ~ 4.2	—	0.10	—	0.05	0.10	余量	LC10
129	7A15	0.50	0.50	0.50 ~ 1.0	0.10 ~ 0.40	2.4 ~ 3.0	0.10 ~ 0.30	—	4.4 ~ 5.4	Be：0.005 ~ 0.01	0.05 ~ 0.15	—	0.05	0.15	余量	LC15
130	7A19	0.30	0.40	0.08 ~ 0.30	0.30 ~ 0.50	1.3 ~ 1.9	0.10 ~ 0.20	—	4.5 ~ 5.3	Be：0.0001 ~ 0.004②	—	0.08 ~ 0.20	0.05	0.15	余量	LC19
131	7A31	0.30	0.6	0.10 ~ 0.40	0.20 ~ 0.40	2.5 ~ 3.3	0.10 ~ 0.20	—	3.6 ~ 4.5	Be：0.0001 ~ 0.001②	0.02 ~ 0.10	0.08 ~ 0.25	0.05	0.15	余量	—
132	7A33	0.25	0.30	0.25 ~ 0.55	0.05	2.2 ~ 2.7	0.10 ~ 0.20	—	4.6 ~ 5.4	—	0.05	—	0.05	0.10	余量	—
133	7A52	0.25	0.30	0.05 ~ 0.20	0.20 ~ 0.50	2.0 ~ 2.8	0.15 ~ 0.25	—	4.0 ~ 4.8	—	0.05 ~ 0.18	0.05 ~ 0.15	0.05	0.15	余量	LC52
134	7003	0.30	0.35	0.20	0.30	0.50 ~ 1.0	0.20	—	5.0 ~ 6.5	—	0.20	0.05 ~ 0.25	0.05	0.15	余量	LC12
135	7005	0.35	0.40	0.10	0.20 ~ 0.7	1.0 ~ 1.8	0.06 ~ 0.20	—	4.0 ~ 5.0	—	0.01 ~ 0.06	0.08 ~ 0.20	0.05	0.15	余量	—

续表 2.1-15

序号	牌号	化学成分 /%											其他			备注
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn		Ti	Zr	单个	合计	Al	
136	7020	0.35	0.40	0.20	0.05~0.50	1.0~1.4	0.10~0.35	—	4.0~5.0	Zr+Ti：0.08~0.25	—	0.08~0.20	0.05	0.15	余量	—
137	7022	0.50	0.50	0.50~1.0	0.10~0.40	2.6~3.7	0.10~0.30	—	4.3~5.2	Zr+Ti：0.20	—	—	0.05	0.15	余量	—
138	7050	0.12	0.15	2.0~2.6	0.10	1.9~2.6	0.04	—	5.7~6.7	—	0.06	0.08~0.15	0.05	0.15	余量	—
139	7075	0.40	0.50	1.2~2.0	0.30	2.1~2.9	0.18~0.28	—	5.1~6.1	⑤	0.20	—	0.05	0.15	余量	—
140	7475	0.10	0.12	1.2~1.9	0.06	1.9~2.6	0.18~0.25	—	5.2~6.2	—	0.06	—	0.05	0.15	余量	—
141	8A06	0.55	0.50	0.10	0.10	0.10	—	—	0.10	Fe+Si：1.0	—	—	0.05	0.15	余量	—
142	8011	0.50~0.9	0.6~1.0	0.10	0.20	0.05	0.05	—	0.10	—	0.08	—	0.05	0.15	余量	—
143	8090	0.20	0.30	1.0~1.6	0.10	0.6~1.3	0.10	—	0.25	Li：2.2~2.7	0.10	0.04~0.16	0.05	0.15	余量	—

① 用于电焊条和堆焊时，铍含量不大于0.0008%。
② 铍含量均按规定量加入，可不作分析。
③ 仅在供需双方商定时，对挤压和锻造产品限定 Ti+Zr 含量不大于0.20%。
④ 作铆钉线材的 3A21 合金的锌含量应不大于0.03%。
⑤ 仅在供需双方商定时，对挤压和锻造产品限定 Ti+Zr 含量不大于0.25%。

7.3 原牌号与新牌号对照（表 2.1-16）

表 2.1-16 原牌号与新牌号对照

新牌号	原牌号	新牌号	原牌号	新牌号	原牌号	新牌号	原牌号	新牌号	原牌号
1A99	原 LG5	1200	代 L5	2A50	原 LD5	3033		5A06	原 LF6
1A97	原 LG4	1235		2B50	原 LD6	3103		5A12	原 LF12
1A95		2A01	原 LY1	2A70	原 LD7	3004		5A13	原 LF13
1A93	原 LG3	2A02	原 LY2	2B70	曾用 LD7-1	3005		5A30	曾用 2103、LF16
1A90	原 LG2	2A04	原 LY4	2A80	原 LD8	3105		5A33	原 LF33
1A85	原 LG1	2A06	原 LY6	2A90	原 LD9	4A01	原 LT1	5A41	原 LT41
1080		2A10	原 LY10	2004		4A11	原 LD11	5A43	原 LF43
1080A		2A11	原 LY11	2011		4A13	原 LT13	5A66	原 LT66
1070		2B11	原 LY8	2014		4A17	原 LT17	5005	
1070A	代 L1	2A12	原 LY12	2014A		4004		5019	
1370		2B12	原 LY9	2214		4032		5050	
1060	代 L2	2A13	原 LY13	2017		4043		5251	
1050		2A14	原 LD10	2017A		4043A		5052	
1050A	代 L3	2A16	原 LY16	2117		4047		5154	
1A50	原 LB2	2B16	曾用 LY16-1	2218		4047A		5154A	
1350		2A17	原 LY17	2618		5A01	曾用 2101、LF15	5454	
1145		2A20	曾用 LY20	2219	曾用 LY19、147	5A02	原 LF2	5554	
1035	代 L4	2A21	曾用 214	2024		5A03	原 LF3	5754	
1A30	原 L4-1	2A25	曾用 225	2124		5A05	原 LF5	5056	原 LF5-1
1100	代 L5-1	2A49	曾用 149	3A21	原 LF21	5B05	原 LF10	5356	

续表 2.1-16

新牌号	原牌号	新牌号	原牌号	新牌号	原牌号	新牌号	原牌号	新牌号	原牌号
5456		6063	原 LD31	6005		7A15	曾用 LC15、157	7050	
5082		6063A		6005A		7A19	曾用 919、LC19	7075	
5182		6070	原 LD2-2	6351		7A31	曾用 183-1	7475	
5083	原 LF4	6181		7A01	原 LB1	7A33	曾用 LB733	8A06	原 L6
5183		6082		7A03	原 LC3	7A52	曾用 LC52、5210	8011	曾用 LT98
5086		6B02	原 LD2-1	7A04	原 LC4	7003	原 LC12	8090	
6A02	原 LD2	6A51	曾用 651	7A05	曾用 705	7005			
6060		6101		7A09	原 LC9	7020			
6061	原 LD30	6101A		7A10	原 LC10	7022			

注：1. "原"是指化学成分与新牌号等同，且都符合 GB/T 3190—1982 规定的旧牌号。
2. "代"是指与新牌号的化学成分相近似，且符合 GB/T 3190—1982 规定的旧牌号。
3. "曾用"是指已经鉴定，工业生产时曾经用过的牌号，但没有收入 GB/T 3190—1982 中。

8 铝材品种

铝材品种有厚板、薄板、箔材、厚壁管、薄壁管、棒材、型材、自由锻件、模锻件、带材、线材和粉材等，粉材也可不列入铝材之内。应当说明，不是一种合金什么铝材都能生产，每一种合金能生产什么品种的铝材，可参阅表 2.1-17。

表 2.1-17 铝材品种

组别	代号	厚板	薄板	带材	箔材	厚壁管	薄壁管	棒材	型材	线材	自由锻件	模锻件
工业用纯铝	1A99	–	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–
	1A97	+	+	+	+	–	–	–	–	–	–	–
	1A93	+	+	+	+	–	–	–	–	–	–	–
	1A90	+	+	+	+	–	–	–	–	–	–	–
	1A85	+	+	+	+	–	–	–	–	–	–	–
工业纯铝	1070A	+	+	+	+	+	+	+	–	+	–	–
	1060	+	+	+	+	+	+	+	–	+	–	–
	1050A	+	+	+	+	+	+	+	–	+	–	–
	1035	+	+	+	+	+	+	+	+	+	–	–
	1A30	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	1200	+	+	+	+	+	+	+	–	+	–	–
	1100	+	+	+	+	–	–	–	–	–	–	–
	8A06	+	+	+	+	+	+	+	+	+	–	–
防锈铝	5A02	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	5A03	+	+	–	–	+	+	+	+	+	+	+
	5A04	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	5A05	+	+	+	–	+	+	+	+	+	–	–
	5056	–	–	–	–	–	–	+	–	+	–	–
	5A06	+	+	+	–	+	+	+	+	+	+	+
	5B05	+	+	–	–	–	–	–	–	+	–	–
	5A12	+	+	–	–	–	–	+	–	–	+	–
	5A13	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	5A33	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–
	5A43	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	3A21	+	+	+	+	+	+	+	–	+	+	+
硬铝	2A01	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–
	2A02	+	+	–	–	–	–	+	–	–	+	–
	2A04	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–
	2A06	+	+	–	–	–	–	–	+	–	–	–
	2B11	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–
	2B12	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–
	2A10	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–
	2A11	+	+	–	+	+	+	+	+	–	+	+
	2A12	+	+	–	+	+	+	+	+	–	+	–
	2A13	–	–	–	–	–	–	+	–	–	–	–
	2A16	+	+	–	–	–	–	+	+	+	+	+
	2A17	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	+

续表 2.1-17

组别	代号	厚板	薄板	带材	箔材	厚壁管	薄壁管	棒材	型材	线材	自由锻件	模锻件
锻铝	6A02	+	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+
	6B02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6070	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
	2A50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+
	2B50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+
	2A70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+
	2A80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+
	2A90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+
	2A14	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+
	4A11	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
	6061	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-
	6063	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-
超硬铝	7A03	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
	7A04	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	+
	7A09	+	+	-	-	+	-	+	+	-	+	+
	7A10	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+
	7003	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-
特殊铝	4A01	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
	4A13	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
	4A17	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5A41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5A66	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-

注："+"表示大都已纳入标准或技术条件的常规产品，根据供需双方商定，有些合金也可生产标以"-"表示的产品。

9 变形铝及铝合金的性能比较和用途

各种变形铝及铝合金都有自己的特点，大致的性能比较和用途参见表 2.1-18。

表 2.1-18 变形铝合金的性能比较和用途

合金及状态	抗蚀性		冷成形性③	可切削加工性④	钎焊性⑤	焊接性⑤			典型用途
	普通①	应力腐蚀开裂②				气焊	电弧焊	点焊	
1050A-O	A	A	A	E	A	A	A	B	电导体，日用器皿，铭牌，各种五金件，散热器等
1050A-HX2	A	A	A	E	A	A	A	A	
1050A-HX4	A	A	A	D	A	A	A	A	
1050A-XH6	A	A	B	D	A	A	A	A	
1050A-HX8	A	A	C	D	A	A	A	A	
1060-O	A	A	A	E	A	A	A	B	石油化工设备，油罐，日用器皿等
1060-HX2	A	A	A	E	A	A	A	A	
1060-HX4	A	A	A	D	A	A	A	A	
1060-HX6	A	A	B	D	A	A	A	A	
1060-HX8	A	A	B	D	A	A	A	A	
2011-T3	D⑦	D	C	A	D	D	D	D	需经切削加工的工件
2011-T4	D⑦	D	B	A	D	D	D	D	
2011-T8	D	B	D	A	D	D	D	D	
2A50-T6	—	—	—	B	—	—	—	—	压气机叶轮、框架
2B60-T6	—	—	—	B	—	—	—	—	飞机压气机叶轮
2A70-T6	—	—	—	B	—	—	—	—	飞机蒙皮，发动机活塞
2A80-T6	—	—	—	B	—	—	—	—	压气机、发动机零件
2A90-T6	—	—	—	B	—	—	—	—	飞机发动机零件
2A14-O	—	—	—	D	D	D	D	B	飞机结构件，卡车车架，火箭焊接件，建筑与交通车辆结构
2A14-T4	D⑦	C	C	B	D	D	B	B	
2A14-T6	D	C	D	B	D	D	B	B	
6A02-T6	—	—	—	B	—	—	—	—	中等强度复杂锻件

续表 2.1-18

合金及状态	抗蚀性		冷成形性③	可切削加工性④	钎焊性⑤	焊接性⑤			典型用途
	普通①	应力腐蚀开裂②				气焊	电弧焊	点焊	
2A01-T4	D	B	A	B	D	D	B	B	温度＜100℃的结构铆钉
2A02-T6	D	B	B	B	D	D	B	B	冰机压气机叶片
2A06-T4	D	B	C	B	D	C	C	B	铆钉与航空结构
2A06-T6	D	B	C	B	D	D	C	B	铆钉与航空结构
2A10-T4	D	C	B	B	D	D	C	B	铆钉
2A11-T4	D⑦	C	C	B	D	D	B	B	飞机螺旋桨叶片，铆钉，螺栓与结构件
2A12-O	—	—	—	D	D	D	D	D	
2A12-T4	D⑦	C	C	B	D	C	B	B	飞机蒙皮、结构件翼梁、铆钉，卡车轮毂，切削加工件
2A12-T6	D⑦	B	C	B	D	D	C	B	
2A12-TX51	D⑦	B	D	B	D	D	C	B	
3004-O	A	A	A	D	B	B	A	B	
3004-H32	A	A	B	D	B	B	A	A	
3004-H34	A	A	B	C	B	B	A	A	金属板配件，H19的用于变薄深拉易拉罐
3004-H36	A	A	C	C	B	B	A	A	
3004-H38	A	A	C	C	B	B	A	A	
3004-H19	A	A	A	C	B	B	A	A	
3A21-O	A	A	A	E	A	A	A	A	
3A21-HX2	A	A	A	E	A	A	A	A	炊具，食品加工设备，化工设备，压力容器，飞机油箱，建筑配件，容器、油路导管
3A21-HX4	A	A	B	D	A	A	A	A	
3A21-HX6	A	A	C	D	A	A	A	A	
3A21-HX8	A	A	C	D	A	A	A	A	
5056-O	A⑥	A⑥	A	A	D	C	A	B	
5056-HX2	A⑥	A⑥	B	B	D	C	A	A	
5056-HX4	A⑥	A⑥	B	B	D	C	A	A	电缆套，铆接镁合金结构的铆钉，筛网，拉链
5056-HX6	A⑥	A⑥	B	B	D	C	A	A	
5056-HX8	A⑥	C⑥	C	C	D	C	A	A	
5056-HX9	B⑥	D⑥	D	B	D	C	A	A	
5A02-O	A	A	A	D	C	A	A	B	
5A02-HX2	A	A	B	D	C	A	A	A	飞机油箱，导管，焊丝，铆钉，舰船结构与各种配件
5A02-HX4	A	A	B	C	C	A	A	A	
5A02-HX6	A	A	C	C	C	A	A	A	
5A02-HX8	A	A	C	C	C	A	A	A	
5A03-O	A⑥	A⑥	A	D	D	C	A	B	
5A03-HX2	A⑥	A⑥	B	D	D	C	A	A	中等强度的焊接结构，冷冲压零件，焊接容器，焊丝，舰船结构
5A03-HX4	A⑥	A⑥	B	C	D	C	A	A	
5A03-HX6	A⑥	A⑥	C	C	D	C	A	A	
5A03-HX8	A⑥	A⑥	C	C	D	C	A	A	
5083-O	A⑥	B⑥	B	D	D	C	A	B	
5083-HX2	A⑥	B⑥	C	D	D	C	A	A	焊接压力容器，舰船、汽车、飞机及低温设施结构，电视塔，钻井设备，运输设备，导弹零件
5083-HX4	A⑥	B⑥	C	C	D	C	A	A	
5083-HX6	A⑥	B⑥	C	C	D	C	A	A	
5083-HX8	A⑥	B⑥	C	C	D	C	A	A	
5A05-O	A⑥	B⑥	B	D	D	C	A	B	高强度焊接结构，压力容器，舰船结构，飞机蒙皮骨架
5A05-HX2	A⑥	B⑥	C	D	D	C	A	A	
5A05-HX4	A⑥	B⑥	C	D	D	C	A	A	
6061-O	B	A	A	D	A	A	A	B	卡车、舰船与铁路车辆结构，家具，管路
6061-T4	B	B	B	C	A	A	A	A	
6061-T6	B	A	C	C	A	A	A	A	
6063-T1	A	A	B	D	A	A	A	A	
6063-T4	A	A	B	D	A	A	A	A	
6063-T5	A	A	B	C	A	A	A	A	栏栅管材，家具与各类建筑型材
6063-T6	A	A	C	C	A	A	A	A	
6063-TX51	A	A	C	C	A	A	A	A	

续表 2.1-18

合金及状态	抗蚀性		冷成形性③	可切削加工性④	钎焊性⑤	焊接性⑤			典型用途
	普通①	应力腐蚀开裂②				气焊	电弧焊	点焊	
6A04-O 6A04-T6	— C	— C	— D	D B	D D	D D	C C	B B	飞机蒙皮、起落架及其他结构件
7003-O 7003-T6	— C	— B	— D	B B	B B	B B	B B	B B	飞机、舰船结构，装甲、浮桥、车辆结构
7A03-T6 7A04-O 7A04-T6	— C⑦ C	— C B	— D D	D B B	D D D	D D D	C C C	B B B	铆钉 飞机蒙皮、起落架及其他结构件
7A09-O 7A09-T6 7A09-T6⑧	— C⑦ C	— C B	— D D	D B B	D D D	D D D	C C C	B B B	飞机及其他高强度结构件，塑料成形模

① 抗蚀性从A级到E级逐级下降。等级是根据盐雾（含5%NaCl或3%NaCl或人造海水）试验或间歇浸入上述溶液中的腐蚀结果评定的。通常，A级和B级材料可在工业或海滨地区应用，不必采取防腐蚀措施，而C、D、E级材料则应采取必要的防腐蚀措施。

② 应力腐蚀开裂性能是按试件在3.5%NaCl溶液中进行间歇浸入试验的结果和长期应用情况确定的：A表示在使用和试验过程中都未见破坏；B表示在使用中未发现破坏实例，但短横向试件在试验中发生轻微损坏；C表示在使用中，如短横向受到拉应力则产生开裂，长横向试样在试验时发生轻微开裂；D表示在使用中，如纵向或长横向承受应力，则发生轻微开裂。

③、④ 性能从A到D和从A到E逐级下降。

⑤ A表示按工业上通用的焊接规范焊接，可获得满意的结果；B表示需采取一些特殊的措施或适当改变常规规范才能获得满意的焊接结果；C表示焊接性差，因裂纹敏感性大，或焊后的抗蚀性和力学性能降到不允许的程度；D表示无法焊接。

⑥ 经高温长时间保温后，等级会改变。

⑦ 厚截面材料为E级。

⑧ 过时效处理。

10 国内外牌号对照

我国变形铝及铝合金牌号与其成分相似或相近的国外牌号间的对照见表2.1-19。

表2.1-19 国内外牌号对照

中国牌号	国际牌号	ISO牌号	欧洲EN牌号（ENAW-）		日本JIS牌号	俄罗斯ГОСТ牌号
			数字型	化学元素符号型		
1A99	1199	—	1199	A199.99	1N99	AB000
1A90	1090	—	1090	A199.90	1N90	AB1
1080 1080A	A1080 1080A	A199.8 A199.8（A）	 1080A	 A199.8（A）	A1080	—
1070 1070A 1370	1070 1070A 1370	 A199.7 E-A199.7	 1070A 1370	 A199.7 EA199.7	A1070	AB00
1060、1A60	1060	A199.6	1060	A199.6	A1060	—
1050、1A50 1050A 1350	1050 1050A 1350	 A199.5 E-A199.5	 1050A 1350	 A199.5 EA199.5	A1050	1011 （АД0） （АД0E）
1145、1A45	1145	—	—	—	—	—
1035 1235、1A35	1035 1235	—	 1235	 A199.35	—	—
1A30	1230	—	—	—	—	1013（АД1）
1200 1100	1200 1100	A199.0 A199.0Cu	1200 1100	A199.0 A199.0Cu	A1200 A1100	 A2
2004	2004	—	—	—	—	—

续表 2.1-19

中国牌号	国际牌号	ISO 牌号	欧洲 EN 牌号（ENAW－）		日本 JIS 牌号	俄罗斯 ГОСТ 牌号
			数字型	化学元素符号型		
2A50、2B50	2006	—	—	—	—	—
2011	2011	AlCu6BiPb	2011	AlCu6BiPb	A2011	—
2014、2A14	2014	AlCu4SiMg	2014	AlCu4SiMg	A2014	1380（AK8）
2014A	2014A	AlCu4SiMg（A）	2014A	AlCu4SiMg（A）		
2214	2214		2214	AlCu4SiMg（B）		
2017、2A11、2B11	2017	AlCu4MgSi			A2017	
2017A	2017A	AlCu4MgSi（A）	2017A	AlCu4MgSi（A）		1100（Д1）
2117、2A01	2117	AlCu2.5Mg	2117	AlCu2.5MgA	A2117	1111（Д1П）
2A21、2A90	2018				A2018	
2218	2218				A2218	
2618、2A70、2B70	2618	AlCu2MgNi	2618A	AlCu2Mg1.5Ni	A2618	1140（AK4）
2219	2219	AlCu6Mn	2219	AlCu6Mn	A2219	—
2A16、2B16、2A20	2319		2319	AlCu6Mn（A）		
2024、2A12、	2024		2024	AlCu4Mg1	A2024	1160（Д16）
2B12、2A06		AlCu4Mg1				
2124	2124		2124	AlCu4Mg1（A）		
2A25	2524					（Д16П）
3003、3A21	3003	AlMn1Cu	3003	AlMn1Cu	A3003	1400（AMц）
3103	3103	AlMn1	3103	AlMn1		
3004	3004	AlMn1Mg1	3004	AlMn1Mg1	A3004	—
3104	3104	AlMn1Mg1Cu	3104	AlMn1Mg1Cu		
3005	3005	AlMn1Mg0.5	3005	AlMn1Mg0.5	A3005	—
3105	3105	AlMn0.5Mg0.5	3105	AlMn0.5Mg0.5	A3105	
4004	4004	—	4004	AlSi10Mg1.5	—	—
4032、4A11	4032	—	4032	AlSi12.5MgCuNi	A4032	—
4043、4A01	4043	AlSi5	4043A	AlSi5（A）	A4043	—
4A13	4343		4343	AlSi7.5		
4047、4A17	4047	AlSi12	4047A		A4047	—
4047A	4047A	AlSi12（A）		AlSi12（A）		
5005	5005	AlMg1（B）	5005	AlMg1（B）	A5005	（AMг1）
5019	5019	AlMg5	5019	AlMg5	—	1551（AMг5П）
5042	5042	—	5042	AlMg3.5Mn	—	—
5050	5050	AlMg1.5（c）	5050	AlMg1.5（c）	—	—
5A66	5051A		5051A	AlMg2（B）	—	
5251	5251	AlMg2	5251	AlMg2		1520（AMг2）
5052、5A02	5052	AlMg2.5	5052	AlMg2.5	A5052	—
5154、5A03	5154	AlMg3.5			A5154	1530（AMг3）
5154A	5154A	AlMg3.5（A）	5154A	AlMg3.5（A）		
5454	5454	AlMg3Mn	5454	AlMg3Mn	A5454	
5554	5554	AlMg3Mn（A）	5554	AlMg3Mn（A）		
5754	5754	AlMg3	5754	AlMg3		
5056	5056	AlMg5Cr	5056A	AlMg5	A5056	
5456、5A05、5B05	5456	AlMg5Mn1	5456A	AlMg5Mn1（A）		1550（AMг5）
5A30	5556		5556A	AlMg5Mn		
5A43	5357	—	—	—	—	—
5082	5082	—	5082	AlMg4.5	A5082	—
5182	5182		5182	AlMg4.5Mn0.4	A5182	

续表 2.1-19

中国牌号	国际牌号	ISO 牌号	欧洲 EN 牌号（ENAW-）		日本 JIS 牌号	俄罗斯 ГОСТ 牌号
			数字型	化学元素符号型		
5083 5183	5083 5183	AlMg4.5Mn0.7 AlMg4.5Mn0.7（A）	5083 5183	AlMg4.5Mn0.7 AlMg4.5Mn0.7（A）	A5083	 1540（AMr4.5）
5086	5086	AlMg4	5086	AlMg4	A5086	—
6101 6101A	6101 6101A	E-AlMgSi E-AlMgSi（A）	6101 6191A	EAlMgSi EAlMgSi（A）	—	—
6005 6005A	6005 6005A	AlSiMg AlSiMg（A）	6005 6005A	AlSiMg AlSiMg（A）	—	—
6A10	6110A	—	—	—	—	—
6A02、6B02 6351	6151 6351	 AlSiMg0.5Mn	 6351	 AlSiMg0.5Mn	A6151	1340（AB）
6060	6060	AlMgSi	6060	AlMgSi	—	—
6061	6061	AlMg1SiCu	6061	AlMgSiCu	A6061	1330（АД33）
6063 6063A	6063 6063A	AlMg0.7Si AlMg0.7Si（A）	6063 6963A	AlMg0.7Si AlMg0.7Si（A）	A6063	1310（АД31）
6070	6070	—	—	—	—	—
6181	6181	AlSi1Mg0.8	6181	AlSi1Mg0.8	—	—
6082	6082	AlSi1MgMn	6082	AlSi1MgMn	—	（АД35）
7003	7003	—	7003	AlZn6Mg0.8Zr	—	—
7005、7A05	7005	AlZn4.5Mg1.5Mn	7005	AlZn4.5Mg1.5Mn	—	—
7A04	7010	—	7071	AlZn6MgCu	—	—
7A52	7017	—	—	—	—	—
7020	7020	AlZn4.5Mg1	7020	AlZn4.5Mg1	—	1925C
7022	7022	—	7022	AlZn5Mg3Cu	—	—
7A15	7023	—	—	—	—	—
7A19	7028	—	—	—	—	—
7A31	7039	—	7039	AlZn4Mg3	—	—
7050	7050	AlZn6CuMgZr	7050	AlZn6CuMgZr	7050	—
7A01	7072	—	7072	AlZn1	7072	
7075、7A09 7475	7075 7475	AlZn5.5MgCu AlZn5.5MgCu（A）	7075 7475	AlZn5.5MgCu AlZn5.5MgCu（A）	7075	1950（B95）
8011	8011	—	8011A	AlFeSi（A）	—	—
8090	8090	—	8090	AlLi2.5Cu1.5Mg	—	—

11 变形铝及铝合金材料生产、检测用标准

11.1 基础标准

1）GB/T 1250—1989 极限数值的表示方法和判定方法；
2）GB/T 3190—1996 变形铝及铝合金化学成分；
3）GB/T 3194—1998 铝及铝合金板、带材的尺寸允许偏差；
4）GB/T 3199—1996 铝及铝合金加工产品的包装、标志、运输、贮存；
5）GB/T 4436—1995 铝及铝合金管材外形尺寸及允许偏差；
6）GB/T 8005—1987 铝及铝合金术语；
7）GB/T 8013—1987 铝及铝合金阳极氧化 阳极氧化膜的总规范；
8）GB/T 8014—1987 铝及铝合金阳极氧化 阳极氧化膜厚度的定义和有关测量厚度的规定；
9）GB/T 8170—1987 数值修约规则；
10）GB/T 8545—1987 铝及铝合金模锻件的尺寸偏差及加工余量；
11）GB/T 11109—1989 铝及铝合金阳极氧化术语；
12）GB/T 14846—1993 铝及铝合金挤压型材尺寸偏差；
13）GB/T 16474—1996 变形铝及铝合金牌号表示方法；
14）GB/T 16475—1996 变形铝及铝合金状态代号；
15）GB/T 16865—1997 变形铝、镁及其合金加工制品拉伸试验用试样；
16）GB/T 17432—1998 变形铝及铝合金化学成分分析取样方法；

17）YS/T 86—1994 船用焊接铝合金型材尺寸和截面特性；

18）YS/T 409—1998 有色金属产品分析用标准样品技术规范；

19）YS/T 417.1～417.5—1999 变形铝及铝合金铸锭及其加工产品缺陷。

11.2 产品标准

11.2.1 板带材

1）GB/T 3618—1989 铝及铝合金花纹板；
2）GB/T 3880—1997 铝及铝合金轧制板材；
3）GB/T 4438—1984 铝及铝合金波纹板；
4）GB/T 6891—1986 铝及铝合金压型板；
5）GB/T 8544—1997 铝及铝合金冷轧带材；
6）GB/T 16501—1996 铝及铝合金热轧带材；
7）YS/T 69—1993 钎接用铝合金板材；
8）YS/T 90—1995 铝及铝合金铸轧带材；
9）YS/T 91—1995 瓶盖用铝及铝合金板、带材；
10）YS/T 242—2000 表盘及装饰用纯铝板；
11）YS/T 421—2000 印刷用PS版铝板基。

11.2.2 箔材

1）GB/T 3198—2003 铝及铝合金箔；
2）GB/T 3615—1999 电解电容器用铝箔；
3）GB/T 3616—1999 电力电容器用铝箔；
4）GB/T 19570—1989 精制铝箔；
5）YS/T 95.1～95.2—2001 空调器散热片用铝箔。

11.2.3 管材

1）GB/T 4437.1—2000 铝及铝合金热挤压管 第一部分 无缝圆管；
2）GB/T 6893—2000 铝及铝合金拉（轧）制无缝管；
3）GB/T 8645—1988 旋压无缝铝筒；
4）GB/T 10571—1989 铝及铝合金焊接管；
5）YS/T 97—1997 凿岩机用铝合金管材。

11.2.4 棒材

1）GB/T 3191—1998 铝及铝合金挤压棒材；
2）GB/T 3954—2001 电工圆铝杆。

11.2.5 型材

1）GB/T 5237—2000 铝合金建筑型材；
2）GB/T 6892—2000 工业用铝及铝合金热挤压型材。

11.2.6 锻件

YS/T 243—1994 纺织经编机盘片用铝合金模锻件。

11.2.7 线材

1）GB/T 3129—1982 铝钛合金线；
2）GB/T 3195—1997 导电用铝线；
3）GB/T 3196—2001 铆钉用铝及铝合金线材；
4）GB/T 3197—2001 焊条用铝及铝合金线材；
5）GB/T 3955—2001 电工圆铝线；
6）GB/T 8646—1998 半导体键合铝-1%硅细丝。

11.2.8 其他

1）GB/T 17171—1997 水性铝膏；
2）YS/T 92—1995 铝合金花格网。

11.3 环保标准

1）GB 3838—1988 地面水环境质量标准；
2）GB 5085—1996 危险废物鉴别标准 腐蚀性鉴别；
3）GB 8978—1996 污水综合排放标准。

11.4 原辅材料等相关产品标准

1）GB/T 178—1977 水泥强度试验用标准砂；
2）GB/T 209—1993 工业用氢氧化钠；
3）GB/T 337—1984 浓硝酸；
4）GB/T 534—1989 工业硫酸技术条件；
5）GB/T 537—1997 工业十水合四硼酸二钠；
6）GB/T 620—1993 化学试剂 氢氟酸；
7）GB/T 622—1989 化学试剂 盐酸；
8）GB/T 625—1989 化学试剂 硫酸；
9）GB/T 626—1989 化学试剂 硝酸；
10）GB/T 628—1993 化学试剂 硼酸；
11）GB/T 629—1997 化学试剂 氢氧化钠；
12）GB/T 676—1990 化学试剂 乙酸（冰醋酸）；
13）GB/T 1177—1991 铸造镁合金；
14）GB/T 1196—1993 重熔用铝锭；
15）GB/T 1266—1986 化学试剂 氯化钠；
16）GB/T 1276—1984 化学试剂 氟化铵；
17）GB/T 1287—1994 化学试剂 六水合硫酸镍（硫酸镍）；
18）GB/T 1294—1993 化学试剂 酒石酸；
19）GB/T 1610—1999 工业铬酸酐；
20）GB/T 1611—1992 工业重铬酸钠；
21）GB/T 2480—1996 普通磨料 碳化硅；
22）GB/T 3499—1995 重熔用镁锭；
23）GB/T 4456—1996 包装用聚乙烯吹塑薄膜；
24）GB/T 4871—1995 普通平板玻璃；
25）GB/T 5138—1996 工业用液氯；
26）GB/T 7744—1998 工业氢氟酸；
27）GB/T 8644—2000 重熔用精铝锭；
28）GB/T 8733—2000 铸造铝合金锭；
29）GB/T 9962—1999 夹层玻璃；
30）GB/T 9963—1998 钢化玻璃；
31）GB/T 11376—1997 金属的磷酸盐转化膜；
32）GB/T 11614—1999 浮法玻璃；
33）GB/T 12768—1991 重熔用电工铝锭；
34）GB/T 13586—1992 铝及铝合金废料、废件分类和技术条件；
35）GB/T 16494—1996 化学试剂 二甲苯；
36）GB/T 17460—1998 化学转化膜 铝及铝合金上漂洗和不漂洗铬酸盐转化膜；
37）GB/T 17748—1999 铝塑复合板；
38）YS 67—1993 LD30、LD31铝合金挤压用圆铸锭；
39）YS/T 275—1994 高纯铝；
40）YS/T 282—2000 铝中间合金锭；
41）YS/T 309—1998 重熔用铝稀土合金锭；
42）YS/T 480—1992 建筑生石灰粉。

11.5 检测方法标准

1）GB/T 228—2002 金属拉伸试验方法；
2）GB/T 231—2002 金属布氏硬度试验方法；
3）GB/T 246—1997 金属管 压扁试验方法；
4）GB/T 1720—1979 漆膜附着力测定法；
5）GB/T 1732—1993 漆膜耐冲击测定法；
6）GB/T 1733—1993 漆膜耐水性测定法；
7）GB/T 1740—1979 漆膜耐湿热测定法；
8）GB/T 1763—1979 漆膜耐化学试剂性测定法；
9）GB/T 1764—1979 漆膜厚度测定法；
10）GB/T 1766—1995 色漆和清漆 涂层老化的评级方法；
11）GB/T 9276—1996 涂层自然气候暴露试验方法；
12）GB/T 1768—1979 漆膜耐磨性测定法；

13）GB/T 1771—1991 色漆和清漆 耐中性盐雾性能的测定；

14）GB/T 1865—1997 色漆和清漆 人工气候老化和人工辐射暴露（滤过的氙弧辐射）；

15）GB/T 3048.2—1994 电线电缆电性能试验方法 金属导体材料电阻率试验；

16）GB/T 3246—2000 变形铝及铝合金制品显微组织检验方法；

17）GB/T 3250—1982 铝及铝合金铆钉线铆接试验方法；

18）GB/T 3251—1982 铝及铝合金管材压缩试验方法；

19）GB/T 3252—1982 铝及铝合金铆钉线铆钉剪切试验方法；

20）GB/T 4340.1～4340.3—1999 金属维氏硬度试验方法；

21）GB/T 4957—1985 非磁性金属体上非导电覆盖层厚度测量 涡流方法；

22）GB/T 5126—2001 铝及铝合金冷拉薄壁管材 涡流探伤方法；

23）GB/T 2039—1997 金属拉伸蠕变及持久试验方法；

24）GB/T 6461—2002 金属覆盖层 对底材为阴极的覆盖层腐蚀试验后的电镀试样的评级；

25）GB/T 6462—1986 金属和氧化物覆盖层 横断面厚度显微镜测量方法；

26）GB/T 6519—2000 变形铝合金产品超声波检验方法；

27）GB/T 6608—1999 铝箔厚度的测定、称量法；

28）GB/T 6682—1992 分析实验室用水规格和试验方法；

29）GB/T 6739—1996 涂膜硬度铅笔测定法；

30）GB/T 6742—1986 漆膜弯曲试验（圆柱轴）；

31）GB/T 6987.1～6987.32—2001 铝及铝合金化学分析方法；

32）GB/T 7998—1987 铝合金晶间腐蚀测定方法；

33）GB/T 7999—2000 铝及铝合金的当电光谱分析方法；

34）GB/T 8015—1987 铝及铝合金阳极氧化膜厚度的试验方法 重量法；

35）GB/T 8752—1988 铝及铝合金阳极氧化 薄阳极氧化膜连续性的检验硫酸铜试验；

36）GB/T 8753—1988 铝及铝合金阳极氧化 阳极氧化膜封闭后吸附能力的损失评定酸处理后的染色斑点试验；

37）GB/T 8754—1988 铝及铝合金阳极氧化 应用击空电位测定法检验绝缘性；

38）GB/T 9266—1988 建筑涂料、涂层耐洗刷性的测定；

39）GB/T 9274—1988 色漆和清漆 耐液体介质的测定；

40）GB/T 9275—1988 色漆和清漆 色克霍尔兹压痕试验；

41）GB/T 9286—1998 色漆和清漆 漆膜的划格试验；

42）GB/T 9753—1988 色漆和清漆 杯突试验；

43）GB/T 9754—1988 色漆和清漆 不含金属颜料的色漆漆膜之20°、60°和85°镜面光泽的测定；

44）GB/T 9761—1988 色漆和清漆 色漆的目视比色；

45）GB/T 9792—1988 金属材料上的转化膜 单位面积上膜层质量的测定 重量法；

46）GB/T 10125—1997 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验；

47）GB/T 11110—1989 铝及铝合金阳极氧化 阳极氧化膜的封孔质量的测定方法；

48）GB/T 11186.1～11186.3—1989 漆膜颜色的测量方法；

49）GB/T 12966—1991 铝合金电导率涡流测试方法；

50）GB/T 12967.1—1991 铝及铝合金阳极氧化 用喷磨试验仪测定阳极氧化膜的平均耐磨性；

GB/T 12967.2—1991 铝及铝合金阳极氧化 用轮式磨损试验仪测定阳极氧化膜的耐磨性和磨损系数；

GB/T 12967.3—1991 铝及铝合金阳极氧化 氧化膜的铜加速醋酸盐雾试验（CASS）试验；

GB/T 12967.4—1991 铝及铝合金阳极氧化 着色阳极氧化膜耐紫外光性能的测定；

GB/T 12967.5—1991 铝及铝合金阳极氧化 用变形法评定阳极氧化膜的抗破裂性；

51）GB/T 14952.1—1994 铝及铝合金阳极氧化 阳极氧化膜检验方法；

GB/T 14952.2—1994 铝及铝合金阳极氧化 阳极氧化膜封孔质量评定 酸浸法；

GB/T 1495.3—1994 铝及铝合金阳极氧化 着色阳极氧化膜色差平均外观质量检验方法 目视观察法；

52）GB/T 16259—1996 彩色建筑胶材料人工气候加速颜色老化试验方法；

53）GB/T 16585—1996 硫化橡胶人工气候老化荧光紫外灯试验方法；

54）YS/T 419—2000 铝及铝合金杯突试验方法；

55）YS/T 420—2000 铝合金韦氏硬度试验方法。

编写：田荣璋（中南大学）
审稿：唐仁政（中南大学）

第2章　变形铝及铝合金生产

1　概述

我国第一个铝加工厂（东北轻合金加工厂，又称101厂）是1956年建成投产的，从此中国有了自己的铝加工工业。至2000年铝加工企业已发展到1 500余家，其中有300余家生产板带，90余家生产线材，其余为型材加工厂。2003年我国电解铝产量已达到550万吨，铝加工材达到360余万吨。其中铝板带产量为112万吨，铝箔约40万吨，铝挤压型材210万吨（80%以上为建筑型材）。

变形铝及铝合金可加工成板材、带材、箔材、管材、棒材、型材、线材、锻件等。其加工过程有熔炼、铸锭、压力加工、热处理及表面处理等。

2　熔炼和铸锭

2.1　熔炼

熔炼炉有各式各样的，方形的、圆形的、可倾动的。工业生产大的可熔炼几十吨，小的熔炼几吨。燃料可用电、油或可燃气体。

熔炼的目的，一是配制合金，控制成分；另一个是为铸锭作准备。

铝能和大多数金属形成合金，但只有八种元素（银、铜、镓、锗、锂、镁、锌和硅）在铝中的最大溶解度超过1%（摩尔分数）。其中铜、镁、锌和硅是普通常用元素，银、镓、锗昂贵很少应用，锂与铝形成合金具有密度小、弹性模量大、比强度高、中子吸收截面大和放射性半衰期短等特点，被某些部门重视，是新兴材料。除此之外，锰、铁、镍、铬、锆、钛和硼等元素，对铝及铝合金的力学性能或工艺性能存在着明显的影响，因而也是常用的合金化元素。

由于这些元素有的熔点很高（如钛、锆、铬、锰等），有的易挥发（如锂、镁等），有的密度大，有的密度小，使熔炼的过程中，控制合金成分和均匀性产生一定困难，因此在加入合金元素时常采用中间合金或金属添加剂。

常用中间合金的成分和性质见表2.2-1。

常用金属添加剂的成分和用途见表2.2-2。

表2.2-1　常用各种中间合金的成分及性质

中间合金	成分（质量分数）/%	熔点/℃	脆性
Al-Cu	45～55Cu	575～600	脆
Al-Fe	6～11Fe	850～900	不很脆
Al-Mn	7～12Mn	780～800	不脆
Al-Ni	18～22Ni	780～810	不脆
Al-Si	15～25Si	640～770	不很脆
Al-Ti	2～4Ti	900～950	不脆
Al-V	2～4V	780～900	不脆
Al-Zr	2～4Zr	950～1 050	不脆
Al-Cr	2～4Cr	750～820	不脆
Al-Be	2～4Be	720～780	不脆
Al-Ce（RE）	10～25Ce（RE）	750～900	不脆
Al-Cu-Ni	40Cu，20Ni	700	脆
Al-Cu-Mn	40Cu，10Mn	650	
Al-Cu-Ti	15Cu，3Ti	650	
Al-Mg-Mn	20Mg，10Mn	580	脆
Al-Be-Mg	25Mg，3Be	800	脆
Al-Mg-Ti	18Mg，3Ti	670	脆
Al-Ti-B	5Ti，1B		不脆

表2.2-2　铝合金金属添加剂成分及用途

品名	成分（质量分数）/%	用途
铁添加剂	75Fe	添加与调整合金成分
锰添加剂	75Mn	添加与调整合金成分
铜添加剂	75Cu	添加与调整合金成分
铬添加剂	75Cr	添加与调整合金成分
镍添加剂	75Ni	添加与调整合金成分
钛添加剂	75Ti	添加与调整合金成分
钛硼添加剂	75Ti＋1.5B，50Ti＋1B	细化铸锭晶粒

为了防止吸气和挥发，常向熔炼中熔体表面上加覆盖剂，净化时加精炼剂，为了能把熔渣除净而不带出金属，在扒渣之前加造渣剂。

熔炼过程中应注意铝和铝合金的纯洁度，防止气体或其他夹杂的混入，并希望获得细晶粒组织的铸锭。因此，在铸造之前都对熔体进行净化处理、变质处理和细化处理。

铝及铝合金中的气体有氢、氧、氮，氢占80%以上。因此铝及铝合金中气体可以近似地认为是氢。气体以三种形态存在：①以气体夹杂或气泡形态；②以氧化物、氮化物、氢化物等固态化合物形态；③在液态或固态中以原子或离子形态分布于金属原子间或晶格中。氢在铝及铝合金中是最不愿意见到的气体，其来源于液态铝与水气的反应。水气主要是炉料、添加剂、熔剂、炉气、耐火材料和工具等带入以及浇注过程与空气接触吸入的。铝液体温度愈高，吸氢愈多。因此，对吸氢来讲，一是防，尽量防止把水气带入；二是排，设法把已吸入的氢排出去；三是溶，排不出去的氢，设法使其以离子状态存在，不要形成氢气（H_2），一般采用加快冷却速度的办法。

为了使铝及其合金纯净，气体和夹杂少，对熔融的铝或铝合金进行精炼（或叫净化）处理。

净化处理分炉内处理和炉外处理两种。

炉内净化分吸附净化和非吸附净化。吸附净化常用的是浮游法，即①向熔体中用气体（惰性气体氩、氮；活性气体氯；或氮氯混合气体）吹洗，利用小气泡把夹杂物和氢气带到铝或铝合金熔体表面上来除掉。②向熔体中加精炼剂（主要是碱金属的氯化物和氟盐的混合物），精炼剂吸附和溶解氧化夹杂，精炼剂分解出来的气体（主要是氯气）与精炼剂一起将氢和夹杂物带到铝或铝合金熔体表面上来除掉。非吸附净化主要是利用真空处理。

炉外净化，一是过滤，二是与炉内净化一样，通过气体吹洗。

铝及铝合金极易吸气，不宜在高温下长时间停留。实际熔炼温度一般选高于液相线温度50～60℃，铝及多数铝合金的熔炼温度为700～750℃。

铸造温度比熔炼温度稍低些。根据铸锭大小、浇注速度及冷却速度等因素，铸造温度略有不同，铝及铝合金铸造温度见表2.2-3。

表 2.2-3 铝及铝合金铸造温度

铝合金牌号	铸造温度/℃
工业纯铝	690 ~ 735
3A21、5A02、5A03、5A05、	690 ~ 730
2A01、2A11、2A12、2A06、2A10、2A16	690 ~ 735
6A02、2A14、6061、6063、2A70、2A80	690 ~ 735
7A04	675 ~ 735

2.2 铸锭

这里讲的铸造是铸锭，即为压力加工提供坯料。铸锭成形方法有块式铁模铸锭法、直接水冷连续或半连续铸锭法和连续铸轧法等。

铸锭形状有块式、圆柱式、管式、杆式等。大的质量有数吨，扁锭截面尺寸大的有 600 mm × 1 500 mm，圆锭直径大的超过 1 000 mm。

铸锭的性能主要指力学性能和冷、热加工性能。铸锭的宏观组织，一般可以分辨出晶粒组织不同的三个区域，即激冷晶区、柱状晶区和等轴晶区（见图 2.2-1)。由图 2.2-1 可见，铸锭表面激冷区比较薄，它对铸锭的性能不发生决定性影响。铸锭性能主要取决于柱状晶区和等轴晶内的比例。对给定的合金而言，如何获得细小均匀致密的等轴晶粒铸态组织，已成为实际生产中追求的目标。

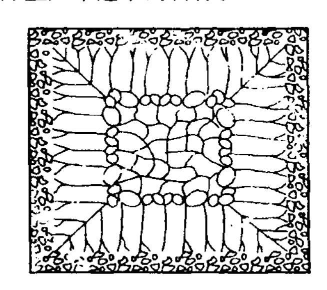


图 2.2-1 铸锭典型宏观组织示意图

生产实际中常出现异常晶粒组织，如粗大晶粒、羽毛状晶、浮游晶、粗大金属间化合物、枞树组织等，这些异常现象，往往对铸锭性能产生不良影响。因此，对铸锭组织的控制成为重要课题。

铸锭组织控制的途径，主要是在凝固时增加形核速率，抑制柱状晶长大，保证铸锭细晶粒组织，以利进一步压力加工。具体方法有，控制凝固时的工艺制度（增加冷却速度和降低浇注温度)；细化处理，即用细化剂增加熔体内部非均质性生核，如以中间合金形式加入的 AlTiB 块或线，盐类细化剂、气态细化剂和动态晶粒细化（搅拌或振动）等。

铸锭常出现的缺陷有偏析、疏松、裂纹、气孔、夹杂和冷隔等，这是不允许的。

3 压力加工

铝及铝合金压力加工生产，是机械力和热互相配合的过程。

变形铝合金在压力加工前一般需进行铸锭均匀化处理，以减少枝晶偏析，消除低熔点共晶体。然后进行热加工、中间退火回复塑性，再进行冷加工，直至达到要求为止。还有的进行最终热处理，取得合格性能。关于铸锭均匀化退火、淬火和时效等热处理工艺见本章第 4 节热处理部分。

3.1 板材、带材和箔材轧制

板、带、箔轧制见图 2.2-2 及图 2.2-3。

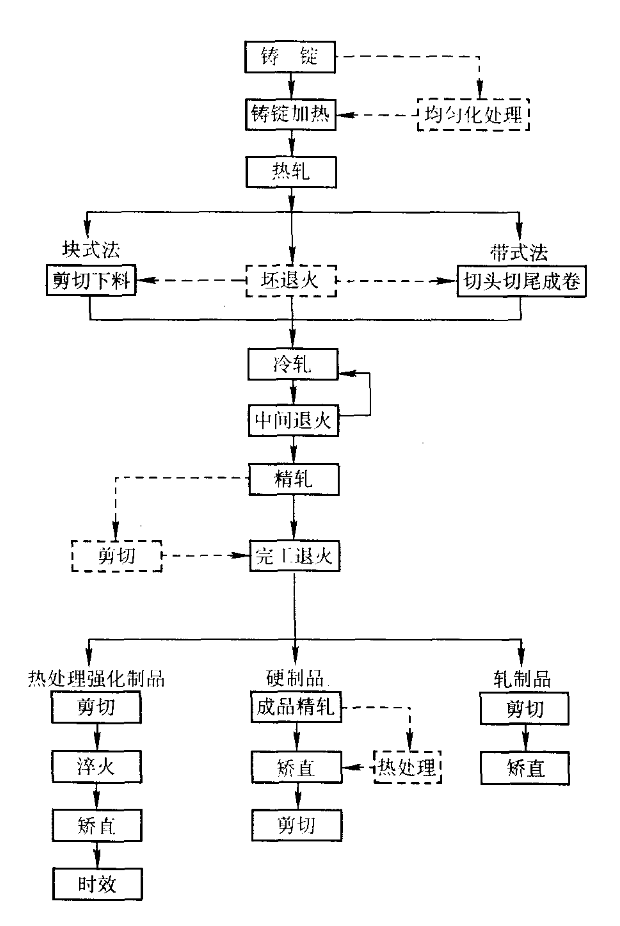


图 2.2-2 铝及铝合金板带生产基本流程示意图

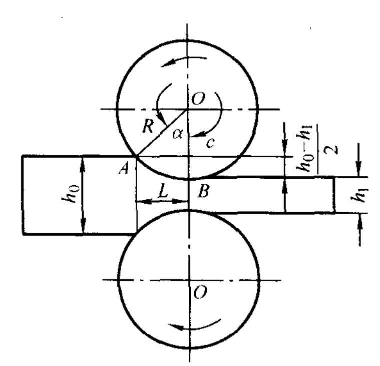


图 2.2-3 轧制时变形区和咬入角

铝及铝合金板、带生产一般不采用酸洗工艺。轧制过程是靠旋转的轧辊和轧件之间形成的摩擦力将轧件拖进辊缝之间，并使之受到压缩产生塑性变形的过程。分热轧和冷轧。在轧制过程中除使轧件获得一定形状和尺寸外，还要获得要求的性能。

轧制过程中轧制力是决定轧制板、带、箔的重要参数，轧制力和轧辊直径大的设备可以轧厚的铸锭。

另一个重要参数是咬入角。图 2.2-3 中轧件和轧辊接触的弧（*AB* 弧）所对应的中心角（α)，称为咬入角。咬入角不合适，无法进行加工。热轧的咬入角为 51° ~ 22°，冷轧的咬入角为 3° ~ 8°，视轧辊表面磨光程度，光的咬入角小些（3° ~ 4°），粗糙的咬入角大些（5° ~ 8°）。

板带轧机分两辊的、四辊的和多辊的。按机架又可分单机架和多机架的。在一台轧机上不能生产任意厚的板带，有个最小可轧厚度。一个铸锭不能一次就轧到成品，要分多道次，一个道次的压下量是有限度的。

热轧的特点是，在轧制的过程中，轧件变形同时存在硬化和软化的现象。因变形速度大，回复和再结晶软化过程来不及进行，轧件随变形程度的增加产生加工硬化，继续下去很可能就无法轧制了。但一般在规定的热轧温度范围内进行热轧，软化过程起主导作用，只有当轧制温度降低时，轧件变形抗力才逐渐增大。铝及铝合金热轧温度为400～500℃。

冷轧的特点是，轧制过程产生加工硬化，轧件的强度和变形抗力增加，伴随着塑性下降。热轧与冷轧相比较，热轧能显著降低能耗，改善加工工艺性能，可采用大铸锭生产，提高了生产率。但是，热轧的产品尺寸较难控制，精度较差，轧件性能波动范围大，表面品质差。冷轧可以获得较薄的轧件，尺寸精度高，表面品质好，产品的组织与性能均匀，能配合热处理生产出力学性能和加工性能优良的各种状态的产品。由于冷轧产生加工硬化，在大部分铝及铝合金轧制生产过程中需要中间退火。

硬制品利用冷轧总加工率控制。半硬制品有两种生产方法，一种是冷轧板利用控制退火办法生产，用 H2n 表示；另一种办法是退火制品利用控制冷轧加工率生产，用 H1n 表示。软制品性能取决于成品退火工艺。

3.2 型材、棒材、管材挤压

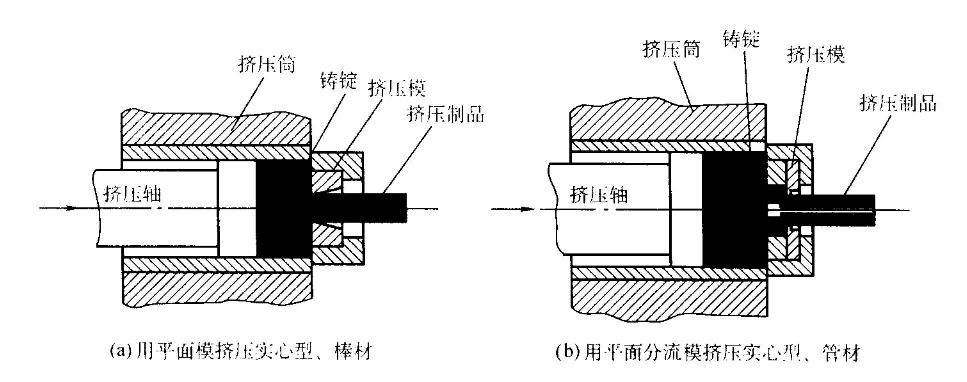
挤压是将坯料（铸锭）放入挤压筒内，施加压力，材料从挤压模孔流出，成为要求的形状。

挤压方法的主要优点是，铸锭在挤压筒内受三向压应力作用，可充分发挥金属的塑性性能，能生产出各种复杂断面的实心或空心型材（包括管材），生产灵活性大。其缺点是，与轧制方法比较，产量低、成本高、成品率低、加工费用高。目前，世界上最大的水压机为 264.6 MN，油压机 93.1 MN，有些已实现了操作的全部自动化。

挤压分正向挤压法和反向挤压法。

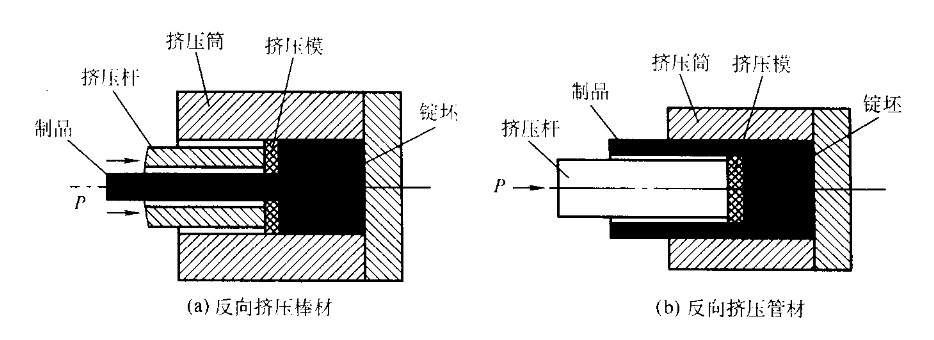
正向挤压法见图 2.2-4。在挤压生产时，挤压筒一端紧靠前梁并且被模具封死，挤压轴在力的作用下向前挤压，迫使筒内金属流出模孔。

反向挤压法见图 2.2-5。在挤压生产时，模轴固定不动，挤压筒紧靠挤压轴（或堵头），在挤压力的作用下，挤压轴和挤压筒同步向前移动，而模轴逐步进入挤压筒内进行反向挤压。



(a) 用平面模挤压实心型、棒材　　(b) 用平面分流模挤压实心型、管材

图 2.2-4　正向挤压法示意图



(a) 反向挤压棒材　　(b) 反向挤压管材

图 2.2-5　反向挤压法生产

正向挤压法和反向挤压法的比较：正向挤压法的优点是换模具简单、迅速，辅助时间少，制品表面品质好，对铸锭表面品质没有严格要求，设备简单，投资费用少，制品外接圆直径大。其缺点是耗能大，挤压过程铸锭升温，制品头尾温度不一致，尺寸精度下降，金属流动不均匀（中心快，边部慢），挤压残料多。反向挤压法的优点是，由于反向挤压时铸锭表面与挤压筒内衬内壁间无激烈摩擦，总挤压力小，比正向挤压时可减少 30%～40%；制品尺寸精度高，力学性能均匀，挤压速度快，成品率和生产率高。其缺点是，制品外接圆直径受模具限制，一般比正向挤压小 30%左右；对铸锭表面品质要求高；设备一次性投资费用比正向挤压的挤压机高 20%～30%。

因此，一般采用正向挤压法。在要求挤压硬合金型材、棒材、管材以及要求尺寸精度高、组织致密无粗晶环的制品时才采用反向挤压法。

挤压制品在挤压之前，铸锭需要加热，大多数铝及铝合金铸锭加热温度为 300～450℃，具体合金均有最合适的温度范围。最重要的是加热温度上限不能超过低熔点共晶的熔化温度。

挤压制品根据用户要求供应挤压状态或者热处理状态。

铝及铝合金挤压材生产工艺流程见图 2.2-6。

3.3 拉制

拉制生产过程见图 2.2-7。拉制是金属坯料在外力（*P*）的拉动下，通过模孔，获得与模孔相应几何形状与尺寸的制品的方法。

用拉制法可生产实心材（棒、型、线材）和空心材（管材和异形空心型材）。铝及铝合金的拉制都是在冷状态下进行的。

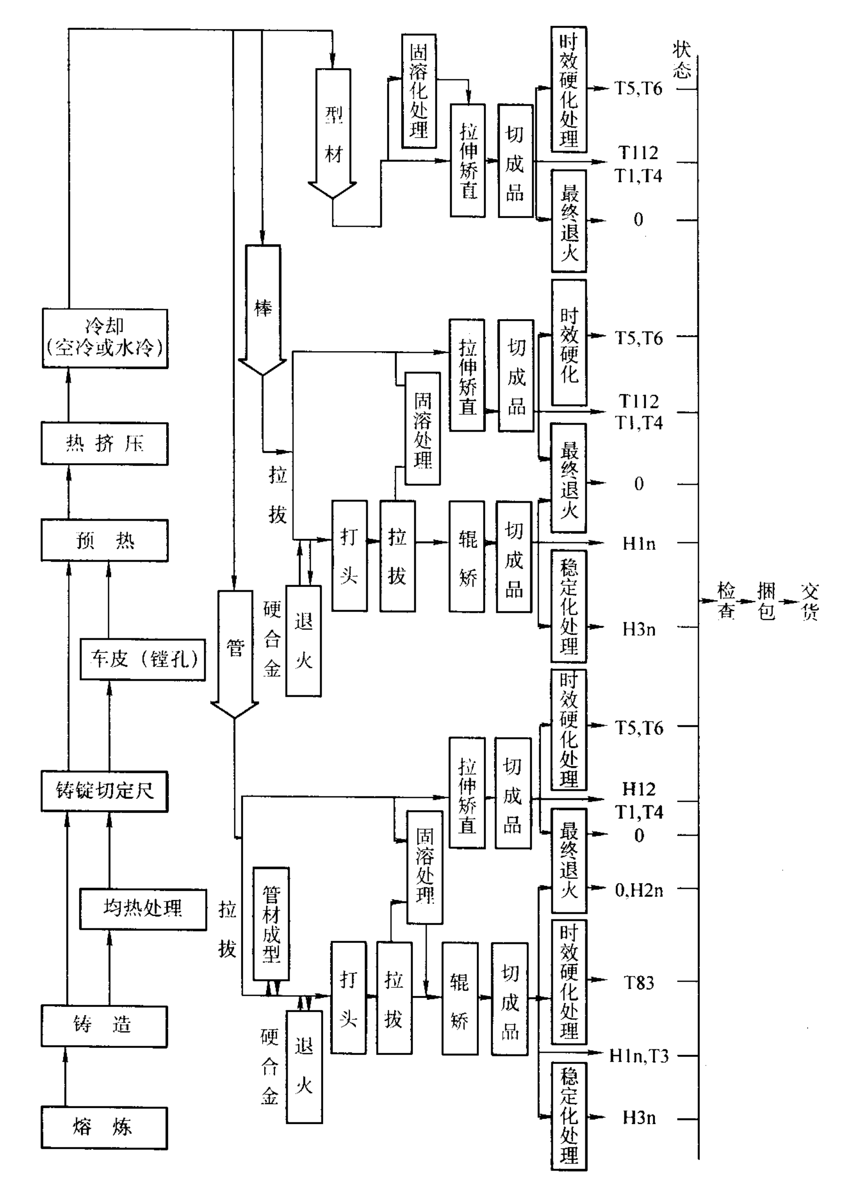


图 2.2-6　铝及铝合金挤压材生产工艺流程图

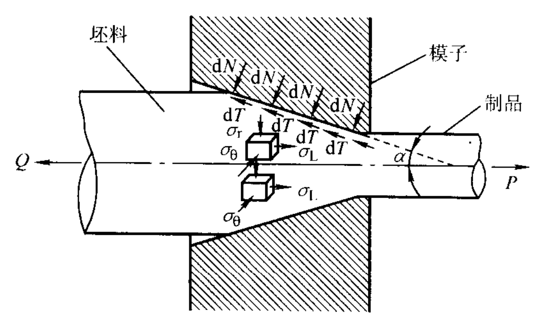


图 2.2-7　实心材拉制

拉制变形中，根据模角（图 2.2-7 中 α）和首次压缩率不同，拉制在变形区中可能出现如图 2.2-8 所表现的五种特征。只有采用合理的模角和首次压缩率时，才能获得均匀的流动变形。制品经过长时间的存放和随后的使用过程，有时会逐渐改变形状、尺寸和性能，这是自然变形。因此，要求尽量减小拉制中的不均匀变形程度。不均匀变形产品中常存在残余应力，在库存的产品中有时产生腐蚀开裂。

空心材的拉制方法有两种，即空拉和衬拉。衬拉时，管坯内表面还要受芯头压力和管内表面接触摩擦力的作用，主要的方法有：短芯头拉制、游动芯头拉制、长芯杆拉制和扩径拉制等。

此外，还有特种拉制方法，如滚模和无模拉制法、旋转模和旋压拉制法、强制润滑和倍模拉制法、附加反拉力和超声波拉制法等。

实心拉制材常产生的品质问题有，尺寸不合格、形状不合格、线材成“8”字形扭拧、纵向划道和三角口、表面划伤、表面波纹、金属压入（凹坑）、表面腐蚀麻点、断裂和性能不合格等。

空心拉制材常产生的品质问题有，空拉头过长、壁厚不均（偏心率过大）、弯曲度过大、内表面划伤、内表面粗糙、管截面有凹陷、横向竹节、纵向开裂、抖纹和断头等。

拉制坯料有连铸连轧、挤压、热穿孔、孔型轧制或冷轧后的半成品。预先退火的坯料可以提高允许的总变形量，需要中间退火的铝合金，由金属加工硬化曲线图决定两次退火间允许的总变形量。拉制很重要的是润滑，润滑能有效地减小坯料与模孔和芯头接触表面之间的摩擦力，主要能使产品尺寸精度、表面品质、组织和性能得到保证。

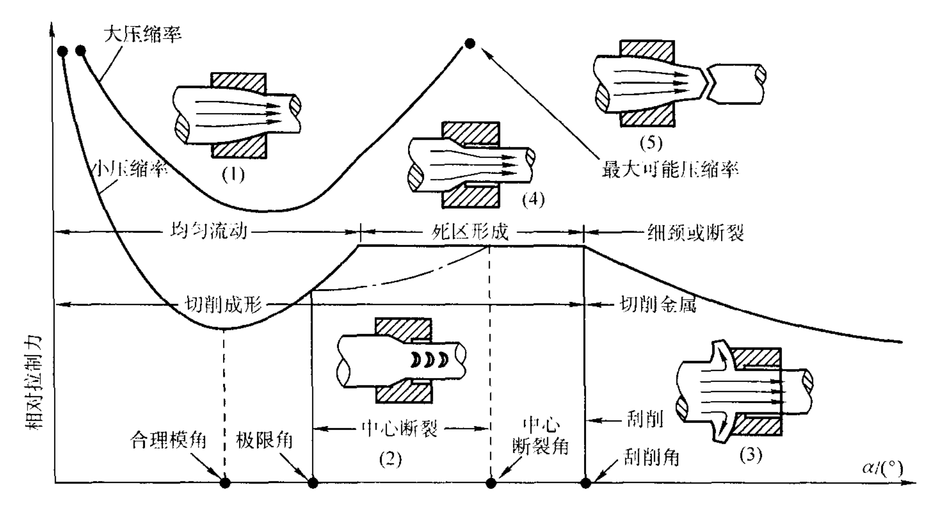


图2.2-8 五种变形特征图

3.4 锻造

铝合金可锻造出各种零件。锻造方法有锤锻，以及压力机、顶锻机、扩孔机等各种锻造设备上锻造。可以自由锻造、模锻、顶锻、滚锻和扩孔锻等。一般来说，尺寸小、形状简单、尺寸精度要求不严的铝合金锻件，可选择锤锻；对于变形量大的、要求剧烈变形的铝合金锻件，宜采用水压机锻造；对于大型复杂的铝合金锻件，则需采用大型模锻水压机来生产。锻造能改善零件内部组织和性能，特别是沿着组织流线方向。因此，要求零件中组织流线完整。

20世纪80年代发展起来的等温模锻和超塑性锻造，由于应变速率小，只能在液压机上锻造。

锻造所用的坯料，可以是铸造的，也可以是变形的，如挤压棒材。为了提高工艺塑性和减小变形抗力，原则上应选择合金在单相状态下进行锻造。

常用铝合金锻造温度见表2.2-4。

表2.2-4 常用铝合金锻造温度范围

合 金	锻造温度/℃	合 金	锻造温度/℃
1070A，1060，1050A	470～380	2A50（铸态）	450～350
5A02	480～380	2A50（变形）	480～350
5A03	475～380	2A80	480～380
3A21	480～380	2A14（铸态）	450～350
2A02	450～350	2A14（变形）	470～380
2A11	480～380	7A04（铸态）	430～350
2A12	460～380	7A04（变形）	450～380
6A02	500～380	7A05（铸态）	425～350
2A70	475～380	7A05（变形）	450～380

合金锻造与高温强度有关，几种变形铝合金的高温强度见表2.2-5。

铝合金铸锭在锻造过程中的总变形程度不仅决定了锻件的力学性能，而且决定了锻件纵向和横向力学性能差异大小。如2A11合金铸锭总变形程度为60%～70%时，力学性能最高，各向异性最小。在锻造各个阶段应避免单向大压缩变形。与此相反，用挤压材作原料，进行压扁，可以明显提高横向性能。

铝合金锻件主要缺陷有过烧、沿分模线裂纹、应力腐蚀开裂、穿流、折叠、粗晶等。

表2.2-5 几种变形铝合金的高温强度 MPa

合金牌号	300℃	350℃	370℃	400℃	450℃	500℃
5A02	120	120	105	90	60	20
3A21	85	75	55	50	40	35
2A02	225	125	100	75	50	20
2A12	145	130	110	85	50	40
2A50	155	90	75	60	45	20
2A70	130	75	65	45	25	20
2A80	90	60	50	35	25	15
2A14	135	125	110	90	75	30
7A04	100	75	65	55	35	—

铝合金的半固态模锻（SSF）是新工艺，它是一种界于液态成形（铸造）与固态成形（压力加工）之间的成形工艺。铝合金在固体体积分数占50%～90%的半凝固状态，一次快速加工成近成品尺寸的零件。其优点是：①铝合金在压力下充型，特别是在高压作用下，可得到薄壁、细晶粒致密组织和高的力学性能。典型半固态模锻铝合金的力学性能见表2.2-6。②半固态模锻温度比铸造温度低，节省能源（约35%）。③适用合金范围宽，可生产各种各样零件。④零件中气体少，气孔和疏松少。⑤各向同性。⑥零件可在模内迅速冷却，能达到固溶处理状态，大多数零件仅采用成本低的T5处理，即可达到性能要求。其缺点是：①设备投资大，只适用批量大的产品生产。②生产线自动化程度高，要求工作人员素质高。③需要预制适用于半固态模锻的锭坯、原材料费用大，等等。

表2.2-6 典型半固态模锻铝合金的力学性能

合金牌号	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	HBS
206①	T7	386	317	6.0	103
2017	T4	386	276	8.8	89
2219	T8	352	310	5.0	89
6061	T6	330	290	8.2	104
6262	T6	365	330	10.0	82
7075	T6	496	421	7.0	135
356	T5	234	172	11.0	98
356	T6	296	193	12.0	90
357	T5	296	207	11.0	90
357	T6	358	290	10.0	100

① 3位数字合金牌号为美国铸造铝合金牌号。

4 热处理

铝合金热处理有四个基本类型，即均匀化退火、再结晶退火、淬火和时效。如果把塑性变形与热处理结合起来，叫形变热处理。其主要作用：①改善工艺性能，保证各工序顺利进行，如均匀化退火改善热加工性能，中间退火改善冷加性能；②提高使用性能，如最终退火、淬火和时效。

铝合金热处理有的是为了加工顺利进行，有的是为了最终性能；有的是加工材的热处理，有的是零件热处理。合金在加工过程中，各种热处理工序及相间的压力加工过程对最终产品都有影响，并不是独立的。

4.1 均匀化退火

在工业生产条件下，铸锭组织是不平衡的，其特征是：

1）基体固溶体成分不均匀，晶内有偏析，组织呈树枝状；

2）平衡状态本为单相的合金，可能出现非平衡的第二相，而多相合金过剩相会增加；

3）铸锭在快冷过程中，可能出现局部过饱和状态。因此，非平衡组织无疑对铸态合金的性能带来很大的影响，如①塑性降低；②耐蚀性下降；③加工产品产生各向异性或增加晶间断裂可能性；④由于晶界出现易熔组织，在加工前加热或热处理时，易产生局部“过烧”，产品报废。

均匀化退火的目的是消除或减少铸锭组织的非平衡状态，使铸锭晶内化学成分均匀，改善第二相形状和分布，使组织达到或接近平衡状态，提高塑性，改善加工性能和最终性能。

铝合金铸锭均匀化退火前后的力学性能变化举例见表2.2-7，可以看出均匀化退火的必要性。

表2.2-7 7A04铝合金铸锭均匀化退火前后的力学性能

铸锭直径/mm	取样方向	取样部位	力学性能					
			未经均匀化		445℃均匀化		480℃均匀化	
			σ_b/MPa	δ/%	σ_b/MPa	δ/%	σ_b/MPa	δ/%
200	纵向	表层	240	0.6	191	4.1	196	6.7
		中心	274	1.8	197	4.9	219.5	7.1
	横向	中心	265.5	0.6	216.6	4.4	218.5	7.9
315	纵向	表层	219.5	0.7	202	4.2	201	6.0
		中心	197	1.0	192	3.8	196	5.6
	横向	中心	218.5	0.4	205	4.2	222	6.4

除上述作用外，半连续铸锭的特点之一是存在较大的残余应力，影响铸锭的锯切、铣面等机械加工的顺利进行（可能发生翘曲等弊端）。如果残余应力过大，还可能造成铸锭爆裂，危及操作人员及设备的安全。均匀化退火可消除铸锭内的残余应力，改善铸锭的机械加工性能。因此，对于残余应力较大且需进行均匀化退火的合金铸锭（例如热处理强化铝合金半连续铸锭），分段、铣削等机械加工应在均匀化退火后进行。

常用铝合金铸锭均匀化退火工艺见表2.2-8。均匀化退火温度比较高，接近易熔共晶体熔化温度，因此有“过烧”的危险。铝合金过烧危险温度见表2.2-9。

表2.2-8 常用铝合金铸锭均匀化退火工艺规程

合金牌号	加热温度/℃	保温时间/h
5A02、5A03、5A05	465~475	12~24
3A21	595~620	4~12
2A06	475~490	24
2A11、2A12、2A14	480~495	10~15
2A16	515~530	12~24
2A10	500~515	20
6A02	525~540	12
2A50、2B50	515~530	12
2A70、2A80	485~500	12
7A04	450~465	12~38
7A09	445~470	24

表2.2-9 铝合金发生过烧的危险温度

合金	温度/℃	合金	温度/℃
2A06	515	7A04、7A09	520
2A11	520	2A50、2B50	545
2A12	505	2A70、2A80	545
2A16	545	2A14	515

4.2 回复及再结晶退火

再结晶退火也有人叫软化退火，其实不准确。在再结晶退火加热温度不高，达不到发生再结晶时，有回复过程。回复过程本质是冷加工后组织中点缺陷和位错运动重新组合的过程，使微细结构发生明显变化，硬度和强度降低。在这一温度范围内进行的退火，叫低温退火，用以控制产品最终性能。

再结晶退火分中间退火和最终退火。中间退火是保证压力加工顺利进行；最终退火是保证使用性能。顾名思义，在退火过程中发生再结晶，使原来冷加工硬化了的制品恢复到具有原来的塑性。

再结晶退火最重要的参数是再结晶温度和加热保温时间。再结晶温度是发生再结晶时的温度，它与冷变形程度和加热时间有关。当变形程度和退火时间不变，再结晶有开始发生温度和完成温度。再结晶温度与冷变形程度和退火时间的关系见图2.2-9和图2.2-10。变形程度达到一定值以后，再结晶开始温度就不再变化了。

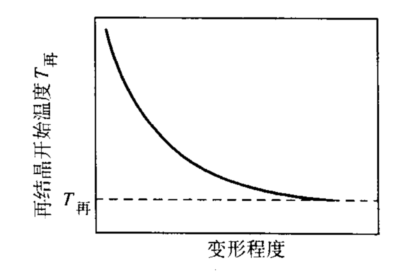


图2.2-9 变形程度对再结晶开始温度的影响

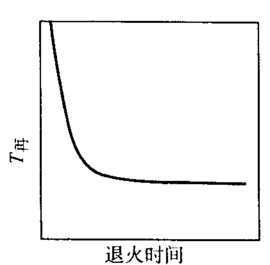


图2.2-10 退火时间与再结晶温度的关系

各种金属的再结晶温度与其熔点间大致有如下关系：

$$T_{再} \approx 0.4 T_{熔} \tag{2.2-1}$$

式中，$T_{再}$ 为再结晶温度，K；$T_{熔}$ 为金属熔点，K。

再结晶退火的另一重要问题是晶粒大小。一般希望晶粒细小而均匀。

加热温度对再结晶粒大小的影响见图 2.2-11。变形程度对再结晶晶粒大小的影响见图 2.2-12。

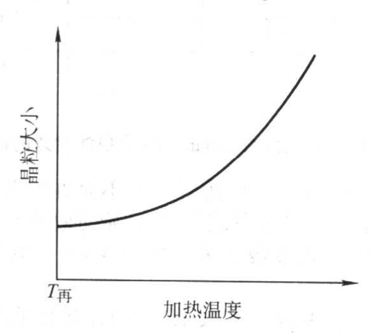


图 2.2-11　再结晶退火时的加热温度对晶粒度的影响

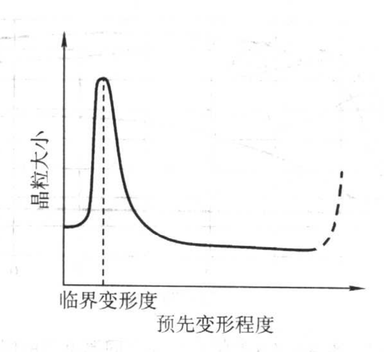


图 2.2-12　再结晶退火时的晶粒度与预先变形程度的关系

由图 2.2-12 可知，超过临界变形程度后，变形程度愈大，变形愈均匀，退火后晶粒愈细。临界变形程度是指，当变形程度在 2% ~ 10%时，变形不均匀，甚至仅有部分晶粒发生了变化。再结晶时生核数目很少，再结晶后晶粒度大小很不均匀，由于能量的关系，大晶粒极易吞并小晶粒而长大，使产品性能降低。生产中应尽量避免这一"临界变形程度"。

再结晶完成瞬间的晶粒径向尺寸（D）为：

$$D = A\ (\dot{G}/\dot{N})^{1/4} \tag{2.2-2}$$

式中，A 为常数；$\dot{N}$ 为形核率；$\dot{G}$ 为晶核长大速率。

由式（2.2-2）说明，形核率大而晶核长大速率小时，会获得细小的再结晶晶粒。

$$\frac{dD}{dt} = K\frac{\sigma}{D} \tag{2.2-3}$$

式中，D 为晶粒直径；σ 为界面能（表面张力）；K 为速度常数。

$$K = A\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \tag{2.2-4}$$

式中，Q 为长大激活能；T 为绝对温度；R 为常数。

在一定温度下，长大后的平均晶粒尺寸与退火时间（t）的关系如下：

$$D = \beta t^n \tag{2.2-5}$$

式中，β 为与温度有关的常数；n 为指数，$n = 0.1 \sim 0.5$。

冷变形金属在加热时的组织和性能的变化见图 2.2-13。

Al-Mg 合金板材在 245℃退火时再结晶过程见图 2.2-14。

铝及铝合金半成品种类很多，生产方案不同，退火工艺均有所区别。铝合金高温退火工艺见表 2.2-10；低温退火工艺见表 2.2-11。这两个表所示的工艺数据只是一个大致参考范围，应用时尚需根据现场实际情况加以调整。

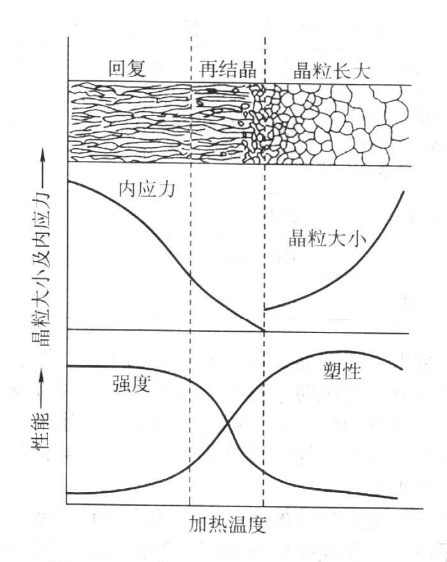


图 2.2-13　变形金属在不同加热温度时晶粒大小和性能变化的示意图

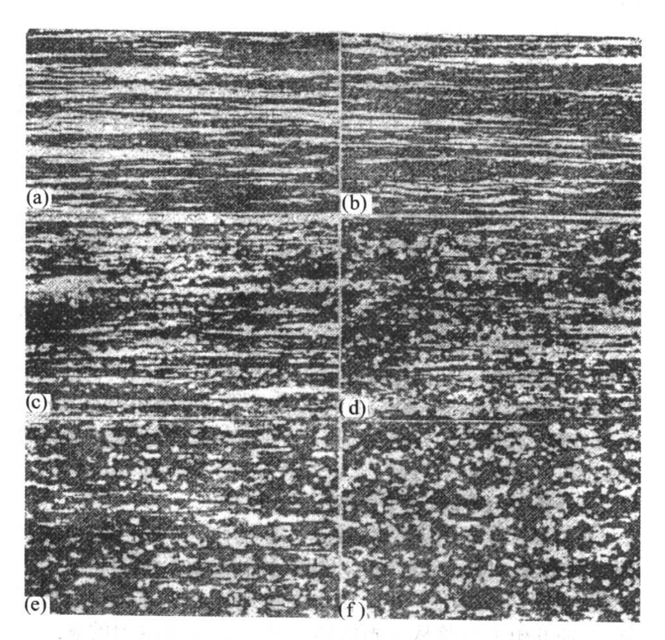


图 2.2-14　Al-Mg 合金板材在 245℃退火时再结晶过程的偏光显微图像（120×）

（a）轧制状态；（b）245℃退火 1 h；（c）退火 2 h；（d）退火 3 h；（e）退火 4 h；（f）退火 7 h

表 2.2-10　铝合金高温退火工艺

合金牌号	退火温度/℃	保温时间/h	冷却方式
2A11、2A12、6A50、6063、6A02、7A04	350 ~ 420	1 ~ 3	炉冷，冷速为 30℃/h，冷至 250℃出炉，7A04，冷至 200℃出炉
5A02、5A03	300 ~ 420	1 ~ 2	空冷
5A05、5A06	310 ~ 335	1 ~ 3	空冷
3A21①、1A30、1035	350 ~ 450	1 ~ 2	空冷或水冷

① 为防止晶粒粗大，3A21 可在盐浴中退火，加热温度为 450 ~ 500℃，保温 7 ~ 30 min，水冷。

表 2.2-11　铝合金低温退火工艺

合金牌号	退火温度/℃	保温时间/h	冷却方式
2A11、2A12、2A50、2A80、6061、7A04、5A03、5A05、5A06	350～370 270～300	1～3 1～2	空冷或水冷 空冷
3A21	250～280	1～2.5	空冷
5A02、纯铝	150～180	1～2	空冷
1A30、1035	150～300	1～2	空冷或水冷

应当指出，再结晶织构与变形织构不同。铝合金板材有强烈生成立方织构倾向。具有立方织构的板材在深拉时，深拉杯边缘上0°及90°位置产生四个制耳。实际生产中，希望不出现制耳，因此应控制再结晶织构。一般可通过调整加工及退火工艺来实现。

橘皮现象也是讨厌的事。具有粗大晶粒的铝合金加工制品，在深拉、弯曲或拉伸成形时，制品表面有时产生一种粗糙的橘皮样表面。改善办法是用细晶粒变形均匀的加工制品为原料。

4.3　淬火（固溶处理）及时效

淬火是将铝合金从固态下的高温状态以过冷或过饱和形式固定到室温。因为，仅仅使高温相以过冷或过饱和状态固定到室温，在淬火过程中晶体结构不发生变化（无多型性转变），称为固溶处理。其主要目的是为了获得过饱和固溶体，给随后的时效做好组织准备。淬火与退火不同，铝合金中有随温度改变第二相溶解和析出过程，必须快冷，淬火时无扩散过程发生。

时效是淬火的后续工序，没有淬火就无所谓的时效。淬火获得的过饱和固溶体，是具有较高能量状态的亚稳定相，只要可能，如加热到一定温度或在室温下保持一定时间，它就会向较低能量的稳定状态转化，这种转化是通过过饱和固溶体的脱溶（分解）来实现的，在脱溶过程中使铝合金的强度、硬度性质提高。淬火和时效可赋予铝合金优良的综合性能。

以 Al-Cu（4%）合金为例。

Al-Cu 合金相图如图 2.2-15。把含 4% Cu 的铝合金加热到 α 单相区，即使 θ（$CuAl_2$）相溶解到 α 固溶体中，并使铜分布均匀（固溶化），然后在水中快速冷却（淬火或固溶处理），使 θ 相来不及从 α 固溶体中析出，结果得到的是过饱和 α 固溶体组织。因此，合金抗拉强度（σ_b）等于250 MPa，比淬火前略有提高，这是因为铜原子溶解到固溶体中的固溶强化效果。虽然如此，抗拉强度不高。若将淬火的 Al-Cu（4%）合金在室温下摆放 4～5 d后，其抗拉强度提高到 400 MPa，见图 2.2-16。随时间延长而发生的强化现象，称时效强化。因为，硬度变化也具有相同规律，也叫时效硬化。在室温下进行的时效称自然时效，在人为加热条件下进行的时效称人工时效。

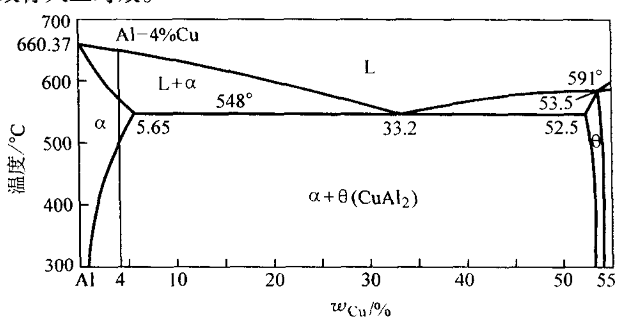


图 2.2-15　铝-铜合金相图

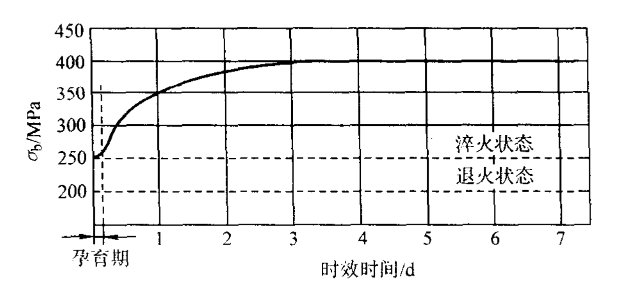


图 2.2-16　含 4% Cu 的铝合金自然时效的曲线

由图 2.2-16 可知，自然时效并不是在时效一开始就明显发生的，有一个“育孕期”。在开始时效的 5～15 h 内，强化速度快，以后就缓慢下来，直至 4～5 d 强度（或硬度）才达到了最高值。

在不同时效温度下（人工时效），强化曲线走向不同，如图 2.2-17。人工时效比自然时效强化效果低，而且时效温度愈高，时效强化速度愈快，最终时效强化效果愈低。

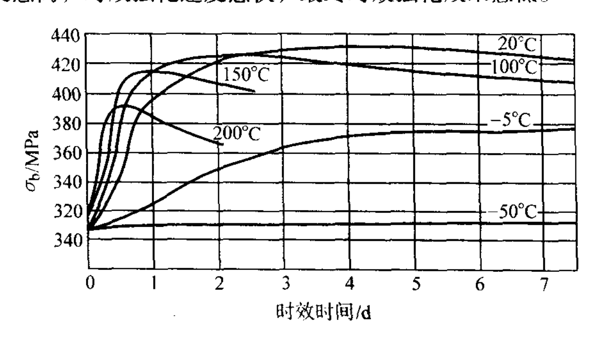


图 2.2-17　含 4% Cu 的铝合金在不同温度下的时效曲线

时效时第二相脱溶符合固态相变的阶次规则，即通常发现在平衡脱溶相出现之前会出现一种或两种亚稳定结构。通过 X 射线及电子显微镜研究证明，脱溶的一般顺序如下：

偏聚区（或称 GP 区）→过渡相（亚稳相）→平衡相

预脱溶期　　　　脱溶期

脱溶时不直接沉淀出平衡相的原因，是由于平衡相一般与基体形成新的非共格界面，界面能大，而亚稳定的脱溶产物往往与基体完全或部分共格，界面能小。界面能小的相，形核功小，容易形成，所以先形成过渡结构，然后演变成平衡稳定相。形成稳定相 θ 时，合金趋向软化。

但是，脱溶过程极其复杂，并非所有铝合金的脱溶过程都按同一顺序进行，见表 2.2-12。

表 2.2-12　主要铝合金系的脱溶序列

合金系	脱溶序列及平衡脱溶相
Al-Cu	GP 区（盘状）→θ″→θ′→θ（Al_2Cu）
Al-Ag	GP 区（球状）→γ′→γ（$AlAg_2$）
Al-Zn-Mg	GP 区（球状）↗η′ → η（$MgZn_2$） ↘T′ → T（$Al_2Mg_3Zn_3$）
Al-Mg-Si	GP 区（杆状）→β′→β（Mg_2Si）
Al-Cu-Mg	GP 区（杆或球状）→S′→S（Al_2CuMg）

各种铝合金 GP 区的尺寸很小，其大小与时效温度有关，温度高，GP 区尺寸大。例如 Al-Cu 合金的 GP 区直径在室温时约为 5 nm，在 100℃ 时为 20 nm，而在 150℃ 时约为 60 nm。各种铝合金 GP 区形状见表 2.2-13。

表 2.2-13 不同铝合金系中 GP 区的形状

GP 区形状	合金系	原子直径差/%
球形	Al-Ag Al-Zn Al-Zn-Mg	+0.7 -1.9 +2.6
盘状	Al-Cu	-11.8
针状	Al-Mg-Si Al-Cu-Mg	+2.5 -6.5

将经过低温时效的合金放在比较高的温度下，低于固溶处理温度，短期加热并迅速冷却，它的硬度将立即下降到和刚淬火时差不多的程度，称这一现象叫“回归”。经回归处理的合金，保持在室温或较高温度下，其强度和硬度（包括其他性质）的变化都和新淬火状态的铝合金相类似。硬铝合金自然时效后在 200～250℃短时间加热后快冷，其性能变化见图 2.2-18。回归处理后的合金又可重新发生自然时效。用自然时效的铝合金铆钉进行铆接时，可先进行回归处理，然后进行铆接。回归处理工艺参数见表 2.2-14。铝及铝合金固溶处理及时效工艺参数见表 2.2-15。

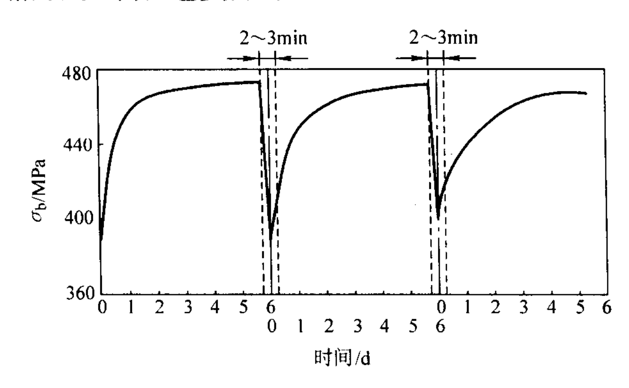


图 2.2-18 硬铝（Al-4%Cu）的回归现象
处理温度 214℃

表 2.2-14 铝合金回归处理工艺参数

合金	回归处理温度/℃	加热时间/s
2A11	240～250	20～45
2A12	265～275	15～30
2A06	270～280	10～15

表 2.2-15 铝合金固溶处理及时效工艺参数

合金	固溶处理温度/℃	时效处理	
		时效温度/℃	保温时间/h
2A11	505～510	自然时效	>96
2011	505～530	155～165	14
2A12	498～503	170～190（或自然时效）	6～12（>96）
2014	495～505	155～175	10～18
2A14	500～505	150～175	6～15
2017	485～510	165～175（或自然时效）	10～16（>96）
2117	495～510	自然时效	>96
2218	505～515	165～175	10
		230～240	6
2219	530～540	170～195	18～36

续表 2.2-15

合金	固溶处理温度/℃	时效处理	
		时效温度/℃	保温时间/h
2024	485～498	185～195	8～16
2618	520～535	195～205	20
4032	505～520	165～175	10
6A02	515～525	150～165（或自然时效）	8～159（>240）
		160～170	10～12
6005	525～535	170～18	8
6061	515～550	155～180（或自然时效）	8～18（>120）
6063	515～550	170～180（或自然时效）	8～18（>120）
6070	540～550	155～165	18
6A50	510～515	150～160（或自然时效）	6～12（>96）
6A70	525～535	165～190	8～16
7075	460～475	115～125	24
7A04	465～480	135～145	16

在铝合金固溶处理加热时，应特别小心。从表 2.2-15 中可以看出，加热温度范围很窄，如 2A11 和 2A12 合金，允许温差仅 5℃。超过上限温度有过烧的危险。过烧是合金晶界局部熔化，晶内出现复熔球，严重过烧晶界出现三角熔化区和晶内有复熔球，此时合金力学性能大幅度下降，合金报废。铝合金发生过烧的危险温度见表 2.2-16。

表 2.2-16 铝合金过烧的危险温度

合 金	温度/℃	合 金	温度/℃
2A06	515	7A04、7A09	520
2A11	520	2A50、2B50	545
2A12	505	2A70、2A80	545
2A16	545	2A14	515

4.4 形变热处理

形变热处理是将塑性变形的形变强化与热处理时的时效强化相结合，使成形工艺与获得最终性能统一起来的一种综合方法。分低温形变热处理和高温形变热处理。

低温形变热处理又称形变时效，最广泛的处理方式有：

1）淬火→冷（温）变形→人工时效；
2）淬火→自然时效→冷变形→人工时效；
3）淬火→人工时效→冷变形→人工时效。

冷变形造成的脱溶相形核更为广泛和均匀，有利于铝合金的强度性能和塑性，有时还能提高抗蚀性。

高温形变热处理的基本条件是热变形后直接淬火并时效。进行高温形变热处理必须满足以下三个条件：①热变形终了的组织是未再结晶的（无动态再结晶）；②热变形后可以防止再结晶（无静态再结晶）；③固溶体必须是过饱和的。铝合金形变热处理工艺见图 2.2-19。进行高温形变热处理能使强度提高，塑性不会降低，甚至塑性及韧性有所提高。组织稳定，有利于提高铝合金的耐热强度。

4.5 铝材状态与生产工艺的关系

铝材状态与生产工艺的关系见图 2.2-20。

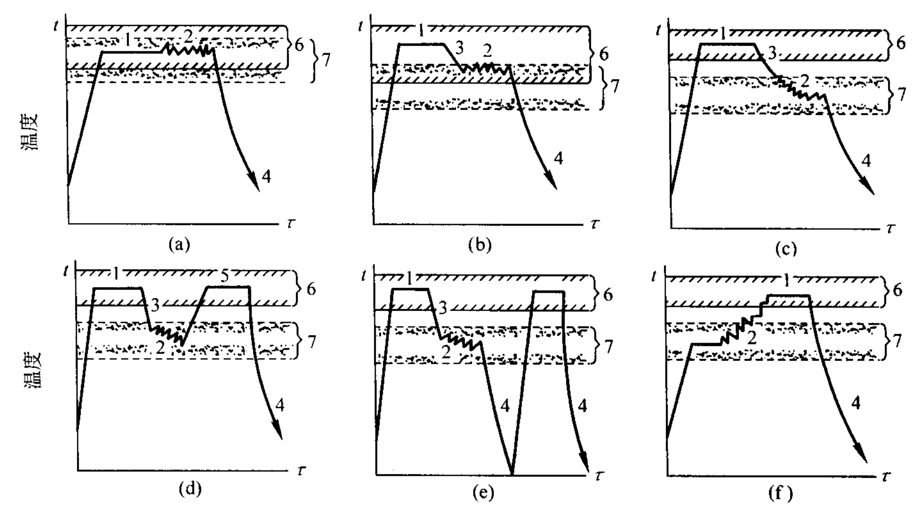


图 2.2-19　高温形变热处理工艺

1—淬火加热与保温；2—压力加工；3—冷至变形温度；4—快冷；
5—重新淬火加热短时保温；6—淬火加热温度范围；7—塑性区

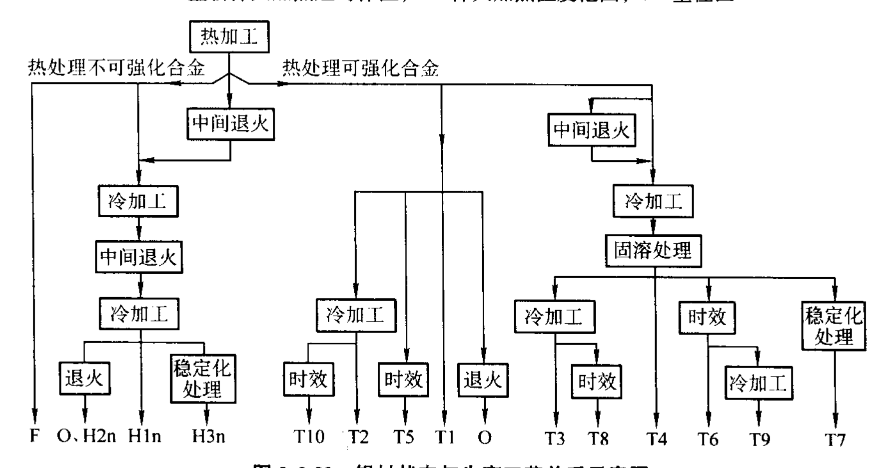


图 2.2-20　铝材状态与生产工艺关系示意图

5　机械加工

5.1　可切削加工性能

铝合金与其他金属材料的可切削加工性能比较见图 2.2-20 和表 2.2-17。

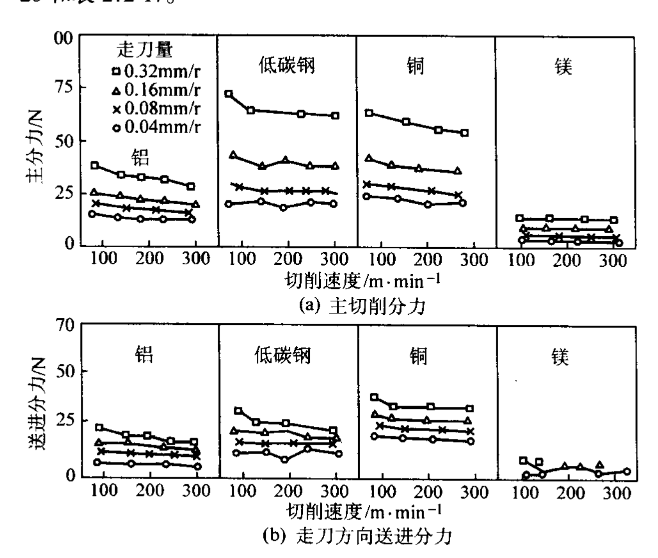


图 2.2-21　各种金属材料的切削阻力

表 2.2-17　金属材料车削数据比较

材料	进刀量/min	切削速度/m·min^{-1}	走刀量/mm·r^{-1}
铝合金	6.3	180 ~ 305	0.13 ~ 0.76
镁合金	< 12.7	~ 305	0.13 ~ 25
锌合金	6.3	75 ~ 180	0.13 ~ 1.5
钢　材	6.3	15 ~ 60	0.13 ~ 2.0
铸　铁	6.3	15 ~ 35	0.13 ~ 2.0

5.2　可切削加工特点

铝合金熔点较低，塑性随温度升高而变大，易产生积屑瘤。由于弹性模量小，线胀系数大，易变形，较难保证工件尺寸精度和表面粗糙度的要求。

铝合金热导率大，硬度强度低，刀具磨损小，可切削效率高。

变形铝合金中，含合金元素量多的，可切削加工性能较好。淬火时效状态的比退火状态的可切削加工性能好。

5.3　典型切削条件及数据

铝合金的可切削加工性能分为两类。

Ⅰ类：指工业纯铝及硬度小于 80HBS 的退火状态的变形铝合金；

Ⅱ类：指淬火时效状态的变形铝合金、电工铝合金和易切削铝合金等。

5.3.1 铝合金典型车削条件及切削数据（见表2.2-18及表2.2-19）

5.3.2 铝合金典型铣削条件（见表2.2-20）

5.3.3 铝合金钻孔的典型数据（表2.2-21及表2.2-22）

5.3.4 铝合金典型的镗孔数据（表2.2-23）

5.3.5 铝合金典型的铰孔数据（表2.2-24）

5.3.6 铝合金典型的拉削数据（表2.2-25）

5.3.7 铝合金典型的锯切数据（表2.2-26）

表2.2-18 铝合金的典型车削条件

操作	工具材料	切削性类别	切削速度/m·min⁻¹	副后角α/(°)	纵向前角γ/(°)	进刀量/mm·r⁻¹	切削深度/mm	冷却剂
粗车	高速钢	Ⅰ	200~400	9~12	30~40	≤1	3~15	无
		Ⅱ	100~250	8~10	20~30	0.2~0.5	3~15	无
	硬质合金	Ⅰ	600~1 200	7~10	20~30	0.3~0.6	3~15	无
		Ⅱ	200~400	7~10	10~20	0.25~0.6	3~15	无
精车	高速钢	Ⅰ	400~900	8~10	40~50	0.05~0.3	0.3~2.5	乳液
		Ⅱ	200~500	7~9	30~40	0.03~0.25	0.3~2.5	或切削油
	硬质合金	Ⅰ	≤2 400	8~10	20~30	≤0.15	0.3~2.5	乳液
		Ⅱ	250~700	7~9	10~20	0.05~0.1	0.3~2.5	或切削油

表2.2-19 金刚石刀具的典型切削数据

切削性类别	切削速度/m·min⁻¹	进刀量/mm·r⁻¹	切削长屑合金的切削深度/mm	切削短屑合金的切削深度/mm
Ⅰ	≤3 000	0.02~0.1	0.02~0.3	0.02~0.6
Ⅱ	800~1 400	0.02~0.1	0.02~0.3	0.02~0.6

表2.2-20 铝合金的典型铣削条件

操作	工具材料	切削性类别	铣削速度/m·min⁻¹	主间歇角α/(°)	侧倾角γ/(°)	进刀量/mm·齿⁻¹	切削深度/mm	螺旋线角λ/(°)	冷却剂
粗铣	高速钢	Ⅰ	300~600	8	25	0.1~0.5	2~20	30~40	无
		Ⅱ	150~400	6	20	0.1~0.5	2~20	≤30	乳液
	硬质合金	Ⅰ	≤2 500	8	20	0.1~0.6	2~20	30~40	无
		Ⅱ	300~800	6	15	0.1~0.6	2~20	≤30	无
精铣	高速钢	Ⅰ	≤1 500	12	30	0.03~0.1	≤0.5	30~40	乳液
		Ⅱ	250~800	10	25	0.03~0.1	≤0.5	≤30	乳液或油
	硬质合金	Ⅰ	≤3 000	12	25	0.03~0.1	≤0.5	30~40	乳液
		Ⅱ	500~1 500	10	20	0.03~0.1	≤0.5	≤30	乳液或油

表2.2-21 攻丝前钻孔的典型数据

标准螺纹	M3	M3.5	M4	M4.5	M5	M6	M8	M10	M12	M14	M16
孔的直径/mm	2.7	3.25	3.6	4.1	4.6	5.5	7.3	9.1	11	12.8	14.8

表2.2-22 麻花钻钻孔的典型数据

工具材料	切削性类别	切削速度/m·min⁻¹	顶角σ/(°)	螺旋角γ/(°)	副后角α/(°)	进刀量/mm·r⁻¹	冷却剂
高速钢	Ⅰ	100~120	140	45~30	17~15	0.02~0.5	乳液
	Ⅱ	80~100	120	35~20	15	0.02~0.5	乳液
硬质合金	Ⅰ	200~300	130	25~15	12	0.06~0.3	无
	Ⅱ	100~200	120	15~10	12	0.06~0.3	无或乳液
备注		钻小孔宜用低速	在薄板上钻孔，宜增大角度或用正顶角钻	钻小孔宜用小螺旋角	在磨副后角时，应注意选择角度	钻小孔进刀量宜小	最好用乳液

表 2.2-23　典型的镗孔数据

工具	工具材料	切削速度 /m·min⁻¹	进刀量 /mm·r⁻¹	顶角 σ/ (°)	螺旋角 γ/ (°)	副后角 α/ (°)	冷却剂
可换镗刀	高速钢 硬质合金	25～40 60～100	0.2～0.3 0.1～0.3	140 120	30～20 20～15	8 6	乳液 乳液
试镗镗刀	高速钢 硬质合金	25～40 60～100	0.2～0.3 0.1～0.3	— —	30～20 20～15	8 6	乳液 乳液
扩孔镗刀	高速钢 硬质合金	20～30 50～70	0.3～0.6 0.2～0.5	60～120 60～120	— —	6 6	乳液 乳液
镗　杆	高速钢 硬质合金	25～40 60～100	0.05～0.6 0.05～0.6	— —	30～20 20～15	12 10	无或乳液 无或乳液

表 2.2-24　典型的铰孔数据

工具	工具材料	倒角 φ_1/ (°)	导角 φ_2/ (°)	铰速 /m·min⁻¹	在下列铰孔直径的进刀量/mm·r⁻¹			
					≤10 mm	>10～25 mm	>25～40 mm	>40 mm
手铰刀	高速钢 硬质合金	45 45	3～4 3～4	— —	— —	— —	— —	— —
机铰刀	高速钢 硬质合金	30 30	0 0	10～20 20～50	0.1～0.2 0.2～0.3	0.2～0.4 0.3～0.5	0.3～0.5 0.4～0.7	0.4～0.8 0.5～1.0
工具	工具材料	偏差	铰孔直径（mm）如下的允许偏差/mm					
			≤10		>10～25	>25～40	>40	
顶钻孔直径尺寸不足	高速钢 硬质合金		≤0.2 0.06～0.1		0.1～0.3 0.1～0.2	0.1～0.3 0.1～0.3	0.2～0.5 0.2～0.4	

注：冷却剂为煤油－松节油（5:4）混合物；或用约33°E的矿物油，或优质油。干铰孔的品质不高。

表 2.2-25　典型的拉削数据

操作	切削性类别	齿面角 γ/ (°)	后角 α/ (°)	进刀量/mm·齿⁻¹	冷却剂
粗拉削	Ⅰ，Ⅱ	20～25	2～4	0.1～0.2	轻矿物油
精拉削	Ⅰ，Ⅱ	20～25	2～4	0.02	或乳液

表 2.2-26　典型的锯切数据

圆　锯

工具材料	切削性类别	切削速度/m·min⁻¹		进刀量/mm·齿⁻¹		主间隙角 α/ (°)	顶角 γ/ (°)	冷却剂
		齿距中等	齿距大	齿距中等	齿距大			
高速钢 硬质合金	Ⅰ	800～2 000 —	400～600 ≤2 500	≤0.02 —	≤0.03 ≤0.03	8 9～7	25 10	乳液、切削油或动物脂
高速钢 硬质合金	Ⅱ	300～1 500 —	200～1 000 ≤1 500	≤0.002 —	≤0.03 ≤0.03	8 9～7	25 8	

带　锯

截面	切削速度/m·min⁻¹	进刀量/mm·齿⁻¹	冷却剂
小	≤2 500	≤0.01	乳液、切削油或动物脂
大	≤1 500	≤0.03	

6　铝结构与制品加工

6.1　冲压成形

冲压成形一般是在常温下利用模具和在压力机的简单作用下，使材料发生分离或变形，以获得一定形状和尺寸的工件的一种加工方法。概括起来可分为分离和成形两类。

分离是将冲压件或毛坯沿着一定的轮廓线互相分离。成形是在不破坏的条件下使毛坯发生塑性变形，成为所需要形状和尺寸的制件。

分离，包括切断、落料、冲孔、切口、切边及整形等。

成形，包括弯曲、卷边、扭曲、深拉、变薄深拉、校平、翻孔、起伏成形、缩口、压印、胀形、复合冲压、连续冲压及连续复合冲压等。

6.1.1　冲裁

冲裁是利用模具从板料上按外形冲下（落料）或冲出孔

(冲孔)的操作。

冲裁时凸、凹模之间的间隙对冲裁件的品质、冲裁力、模具寿命的影响很大，是制订冲裁工艺和设计模具时极其重要的因素。

在冲裁过程中，冲裁件的上下裂纹不一定重合，这和冲裁模的间隙大小有关。把凸、凹模的间隙控制的合适，则凸、凹模刃口沿最大剪应力方向产生的裂纹将重合，冲制的制件断面比较平直、光洁，毛刺也小。间隙过大或过小都不能得到满意的制件断面。合适的间隙一般取：

$$Z = mt \tag{2.2-6}$$

式中，Z 为间隙，mm；m 为系数，与材料的性质和厚度有关；t 为材料厚度，mm。

一般情况下，间隙 $Z=(14\% \sim 24\%)t$。

当铝材很薄时，m 可取 6% ~ 10%。当铝材厚度 $t>$ 3 mm 时，由于冲压力大，可适当放大 m 值（如1.5倍）。

6.1.2 弯曲

将坯料弯成一定角度、曲率和形状的零件的工艺方法叫弯曲。常见各种典型弯曲零件见图2.2-22。

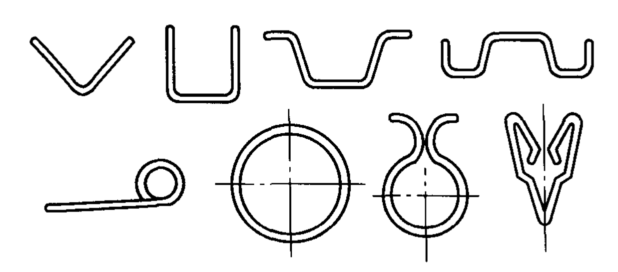


图2.2-22 各种典型弯曲零件

弯曲过程中，在变曲圆角的变形区内，外层材料受到切向拉伸，内层材料受到切向压缩。在伸长与压缩之间存在有保持不变的中性层，即中性层的长度等于弯曲前毛坯的长度。中性层切向应力为零，应变也为零。

铝及铝合金最小弯曲半径见表2.2-27。

表2.2-27 铝及铝合金最小弯曲半径

材 料	退火状态		冷作硬化状态	
	弯曲线位置		弯曲线位置	
	垂直纤维	平行纤维	垂直纤维	平行纤维
铝	0.3t	0.45t	0.5t	1.0t
硬铝（退火状态）	1.3t	2.0t	2.0t	3.0t
硬铝（硬状态）	2.5t	3.5t	3.5t	5.0t

注：t 为材料厚度。

6.1.3 深拉

深拉是利用模具使平板毛坯变成筒形零件或将筒形毛坯再拉成筒形零件的工艺，深拉可生产筒形、锥形和其他曲线的旋转体空心零件，也可生产矩形和其他不规则形状的空心零件。深拉过程见图2.2-23。

深拉时由于板料具有方向性，凸、凹模间隙不均匀，板料厚度不均，摩擦阻力不等及定位不准等影响，使深拉工件口部或凸缘周边不齐，必须修边。因此，毛坯尺寸必须留出切边余量。

深拉时，为防止深拉过程中的起皱问题，在实践中主要采用压边圈的方法。在什么情况下采用压边圈，见表2.2-28。拉伸不可能一次完成，故存在一个深拉次数（n），应该在规定深拉次数内拉完。为了计算深拉次数，引进“深拉系数”概念，即每次深拉后圆筒直径与深拉前毛坯（或半成品）直径之比：

$$m_1 = \frac{d_1}{D},\ m_2 = \frac{d_2}{d_1},\ \cdots,\ m_n = \frac{d_n}{d_{n-1}}$$

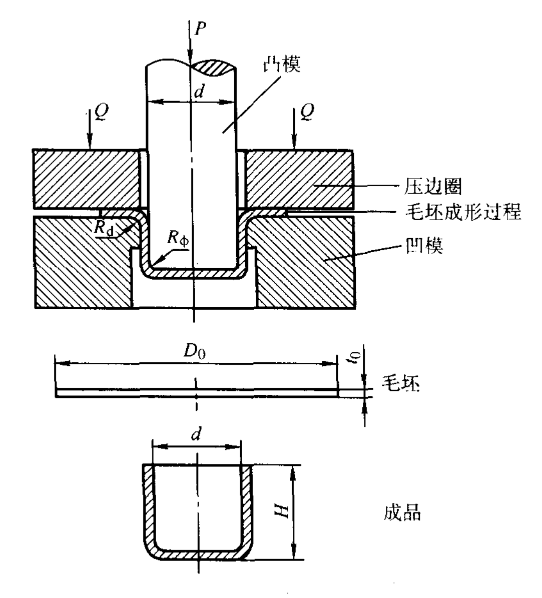


图2.2-23 深拉过程

表2.2-28 压边圈的采用

深拉方法	第一次拉伸		以后各次拉伸	
	$t/D \times 100$	m_1	$t/D \times 100$	m_n
用压边圈	<1.5	<0.6	<1	<0.8
可用可不用压边圈	1.5~2.0	0.6	1~1.5	0.8
不用压边圈	>2.0	>0.6	>1.5	>0.8

注：t 为毛坯厚度，mm；D 为毛坯直径，mm。

6.1.4 其他板料成形工艺

除上述冲裁、弯曲、深拉外，还有局部成形、翻边、缩口、胀形、矫平和整形。另外，复杂形状的零件不是一个工序或一种成形方法就能制做完成的，而需要多种冲压工艺组合起来进行加工。怎样合理地组合多种工序冲压出合格制品，需要认真分析和研究。

6.2 联接

铝及铝合金可以采用螺栓联接、焊接、铆接、粘接等方法联接。

6.2.1 焊接

除部分高强度铝合金尚不适于焊接外，其他变形铝及铝合金均可焊接。工业纯铝和Al-Mn系防锈铝合金的可焊性良好，焊接裂纹敏感性较低，在自然环境中，焊接接头几乎与本体材料一样，不会发生腐蚀。但在焊接规范不适当时，容易产生气孔。

Al-Mg系合金也有良好的可焊性。镁含量对焊接裂纹敏感性的影响见图2.2-24。由图2.2-24可知，含1% ~ 2% Mg的合金，抗裂纹能力最低。如果焊接本体材料选用的是低镁铝合金，采用含镁量高的或含0.15% ~ 0.25% Ti的焊丝（填充材料），也能防止产生裂纹。

焊接加工硬化及稳定化处理的中、高含镁量合金时，应采用中等含镁量的含少量锆的焊丝，形成裂纹倾向低，接头强度高，塑性和抗蚀性能好。

Al-Mg-Si系合金可焊性能尚可，一般采用含微量钛或锆的Al-Si合金为焊丝。

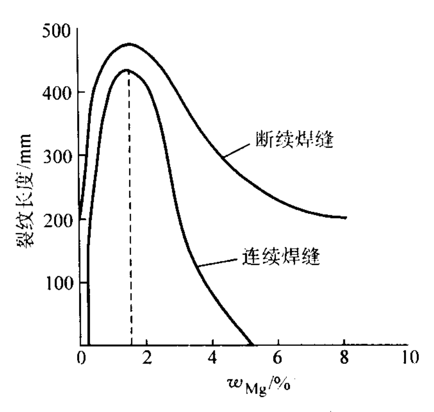


图 2.2-24 镁对焊接裂纹敏感性的影响

Al-Cu系合金的抗焊接裂纹性能较差。这些合金中还含有能形成较低熔点的多元共晶体的镁和硅，因此焊接裂纹敏感性高，熔焊困难。焊后，由于热作用会改变母体合金组织结构和状态，降低母体合金热影响区的性能。采用含钛和硼的Al-Cu合金焊丝，焊接性能大为改善。

Al-Zn-Mg系合金焊接性能差，尤其是含铜的，焊接性能更差。为改善该系合金可焊性，提出牺牲一部分强度，减少焊缝的裂纹倾向性，采用加锆的Al-Mg合金焊丝。还有其他办法。

焊接时，除了考虑可焊性外，还必须考虑焊缝强度、塑性和抗蚀性。还有些构件焊接后需进一步塑性加工或阳极氧化处理，有些合金材料焊接后还需通过热处理恢复部分强度和保证焊缝的抗蚀性，因此，尽可能地采用与母体材料成分相同或相近的焊丝为充填材料。

铝及铝合金焊接极易氧化，目前应用最广泛的是惰性气体保护下的电弧焊，包括钨极惰性气体保护焊和自耗金属电极惰性气体保护焊。惰性气体一般采用氩气，常称为氩弧焊。

电阻焊接也是铝及铝合金的重要焊接方法，包括点焊、缝焊、闪光对焊等。

采用焊接剂的气焊广泛使用于某些薄板的焊接中。

软、硬钎焊也常用。至于电子束焊、等离子焊、爆炸焊接等方法在铝及铝合金的焊接中也在逐渐地被采用。

铝及铝合金的焊接性能及适用范围见表 2.2-29。

表 2.2-29 铝及铝合金的焊接性能及适用范围

焊接方法	材料相对焊接性能及适用范围							简要说明
	工业纯铝	铝锰合金	铝镁合金		铝铜合金	适用厚度范围/mm		
	1070A ~ 8A06	3A21	5A05 5A06	5A02 5A03	2A11 2A12 2A16	适宜范围	一般界限	
钨极氩弧焊（手工、自动）	很好	很好	很好	很好	很差	1 ~ 10	0.9 ~ 25	填丝或不填丝，厚板需预热，交流电源
熔化极氩弧焊（半自动、自动）	很好	很好	很好	很好	较差	≥8	≥1	直流反接，焊丝为电极，热量大且集中，厚板需预热和保温
熔化极脉冲氩弧焊（半自动、自动）	很好	很好	很好	很好	较差	≥2	1.6 ~ 8	适用于薄板焊接
电阻焊（点、缝焊）	较好	较好	很好	很好	较好	—	铝箔 ~ 4	需要电流大
气焊	很好	很好	很差	较差	很差	0.5 ~ 10	0.3 ~ 25	中性焰焊接，热量不集中，变形大，效率低，设备简单、方便
碳弧焊	较好	较好	很差	很差	很差	1 ~ 10	—	直流正接，石墨电极，劳动条件差，品质不稳定
手工电弧焊	较好	较好	较差	较差	很差	3 ~ 8	—	在不具备氩弧焊情况下使用
电子束焊	很好	很好	很好	很好	较好	3 ~ 75	≥3	能量高度集中，焊接品质好，适用于厚工件
等离子弧焊	很好	很好	很好	很好	较差	1 ~ 10	—	焊接速度快，焊缝晶粒细，抗气孔性能好
原子氢焊	较好	较好	较差	较差	很差	—	0.5 ~ 8	目前较少使用

6.2.2 粘接

除焊接、铆接外，粘接也是一种早就使用的不可拆的联接方法。与焊接和铆接相比，粘接有本质的不同。它的特点是，不需要钻孔，采用面接合，不需要加热到高温，不会引起组织及性能变化，不产生局部应力集中和变形。密封性好，容易联接各种尺寸与复杂形状的工件。所有铝材均可使用，工艺简单，作业迅速。

其缺点是，接触面不清洁，胶层不均，固化温度与压力控制不当，会使粘接处产生缺陷，还不易发现，降低联接件可靠性。粘接工艺温度一般不允许超过250℃，否则，粘接层强度低。配好的粘接剂在室温下都有一定的固化时间，不便长期保存。要根据不同用途来选择粘接剂，一般应与铝材具有相溶性。粘接后无法简单地分离解体。粘接剂可能散发出对人身有害物质，注意安全。

铝材的粘接是随着航空航天工业的发展而迅速兴起的。近些年来也广泛用于建筑业和修船业，它将会发展到如汽车业等其他行业。

粘接工艺有如下步骤：①预处理，通过机械处理或化学

处理，将预粘接表面清理干净。②粘接剂的配制（按生产厂说明书进行）。③涂粘接剂，必须在粘接表面上形成一层薄而均匀的膜。④粘接，把粘接的工件装配好，并施加一定的压力。⑤固化处理。这是将粘接剂中的高聚物由线型分子交联成网状或体型结构大分子的过程。固化温度、压力和时间是影响粘接接头的物理、力学性能的三个因素，必须掌握好。

6.2.3 铆接

铆接是一种古老的方法，但仍是铝材一种重要的可靠的联接方法，通常在无法焊接或焊接达不到性能要求或要求经济的联接时才采用。

铆钉材料与所铆材料应匹配（见表2.2-30），主要是避免接触腐蚀与缝隙腐蚀。异种金属接触，全部接触面最好都经过铬酸锌盐处理。通常，异种金属之间应放绝缘垫。

表2.2-30　结构材料的匹配铆钉材料表

结构材料	铆钉材料
工业纯铝(各种状态)、3A21-O、5A02-O、3004-O	5056
2A14-T6、2A14-T4、2A12-T4、7A09-T6	2A01、2A11、2A12、6061
3A21及5A02、各种硬状态	6061
6061-T6、6063-T6	6061

螺钉联接类似铆接。螺钉材料多用2A12和7A09时效状态制造，也可用易切削合金2011-T3制造。但是，这些合金抗蚀性差，因此，所制螺钉都要进行阳极氧化处理。要求抗蚀性高时，可用6061时效状态或5056合金制造。

7　铝及铝合金的腐蚀及防护

7.1　一般腐蚀特点

铝是一种电负性金属，其电极电位为 -0.5～-3 V，99.99%纯度的铝在5.3% NaCl+0.3% H_2O_2 水溶液中，对甘汞参比电极的电位为 -0.87～+0.01 V。虽然铝是最活泼的金属之一，但在许多氧化性介质、水、大气、部分中性溶液，许多弱酸性介质与强氧化性介质中，有相当高的稳定性。这是因为铝在上述介质中，在表面上很快形成一层致密的连续的氧化膜（Al_2O_3），其摩尔体积约比铝的大30%，氧化膜处于压应力状态，当其遭到破坏时又会立即形成，因此具有保护作用，表现出铝的抗腐蚀抗氧化性能强。在干燥空气中形成的氧化膜厚度约1 nm，在相对湿度>80%时，可达100～200 nm，但其致密度会降低。

通常，氧化膜在pH=4.0～9.0的溶液中以及在浓硝酸或100%浓硫酸中和浓氢氧化氨溶液（pH=13）中是稳定的。在稀硝酸、稀硫酸和有机酸中腐蚀很慢，而在盐酸、氢氟酸、氢溴酸和碱溶液中不耐腐蚀。一般认为，凡是能改善氧化膜致密性、增加氧化膜厚度、提高氧化膜绝缘性能的因素，都有助于抗蚀性的提高。反之，凡是降低氧化膜有效保护能力的任何因素，不管是机械的，还是化学的，都会使铝的抗蚀性能下降。综上所述，铝及铝合金的腐蚀行为取决于氧化膜的完整性、环境和成分三个因素。

铝及大多数铝合金在自然环境大气、淡水、大多数食品和化学品中都具有良好的抗蚀性。抗蚀性随着这些条件的差异也会有很大的差别，例如大气环境，有乡村、城市、海洋之分，不同大气环境下腐蚀速度相差16倍之多，显然，乡村的大气干净，城市的差些，海洋大气中含有盐分，这是可以理解的。

根据环境和材料的不同，主要的腐蚀类型有均匀腐蚀、点腐蚀、晶间腐蚀和应力腐蚀等。

7.2　变形铝合金的抗蚀性

变形铝合金在空气、酸与自来水中的抗蚀性排列按如下次序递降：Al，Al-Mn合金，Al-Mg合金，Al-Mg-Si合金，Al-Si合金，Al-Zn-Mg合金，Al-Zn-Mg-Cu合金，Al-Cu-Mg合金，Al-Cu合金。在碱性溶液与海水中是，Al-Mg合金，Al，Al-Mn合金，Al-Mg-Si合金，Al-Zn-Mg合金，Al-Si合金，Al-Zn-Mg-Cu合金，Al-Cu-Mg合金，Al-Cu合金。应指出，上述排列次序是大致的。具有剥落腐蚀、晶间腐蚀或应力腐蚀的合金，经热处理消除这些腐蚀敏感性后，上述排列次序才是正确的。

在乡村大气中铝的腐蚀不明显，仅表面发暗。铝及铝合金在海洋大气中会很快失去光泽。在乡村大气中，1×××、3×××和5×××系合金的腐蚀速度≤0.03 μm/a，在大多数工业地区，腐蚀速度为0.8～2.8 μm/a，而在污染严重的工业地区，腐蚀速度可高达15 μm/a。

空气中相对湿度对铝的大气腐蚀也有较大的影响。一般而言，相对湿度RH≤65%时，不会发生大气腐蚀，若RH>65%，铝表面附有一层水膜，会出现明显的大气腐蚀。

靠海越近，海雾中的氯化物含量越高，铝结构腐蚀也越严重。造船用的铝合金，必须采取防腐措施，如涂漆或包铝。

工业纯铝在纯水中的抗蚀性，取决于水温、水质和铝的纯度。水温低于50℃时，铝的纯度越高越抗腐蚀。水中如含有少量活性离子，如 Cl^-、Cu^+ 等，抗蚀性急剧下降。水的蒸馏、软化和冷凝设备均可用铝来制造。

Al-Mg合金在海水中腐蚀速度很慢。含镁量<5%时，如热处理不当，会有晶间腐蚀和应力腐蚀倾向。6061、6063等Al-Mg-Si系合金的抗蚀性能比Al-Mg系合金稍差一些，可用于造船。用硬铝造船必须采用包铝层保护。

Al-Mn合金在大气和海水中的抗蚀性与纯铝相当。

除含铜的2×××及7×××系合金外铝及其他系铝合金对大多数土壤是抗腐蚀的。如果土壤被污染，抗腐蚀性能下降。埋在地下的铝结构，如果与其他金属构成电路，会发生电化腐蚀。

铝对大多数食品是抗蚀的，可用于食品和饮料包装。由于铝对人体有影响，食品和饮料包装不宜用裸铝，须涂保护层。

铝与很多化工产品接触不发生腐蚀，但在有些化工产品中会迅速溶解。

铝合金应力腐蚀（SCC）是金属在应力（拉力或内应力）和腐蚀介质的联合作用下所发生的一种破坏，也是最危险的破坏。其特征是形成腐蚀-机械裂缝，既可沿着晶界发展，也可穿过晶粒扩展。1×××、3×××系合金和含镁量低于3%的5×××系合金不发生应力腐蚀；2×××系合金和含镁量大于3%的5×××系合金及7×××系合金均存在应力腐蚀；而6×××系合金偶尔有应力腐蚀。工业变形铝合金的应力腐蚀等级比较见表2.2-31。

7.3　铝及铝合金的腐蚀控制与防护

1）正确选择合金材料　在变形铝合金中，Al-Mg系合金抗蚀性最好，其次是纯铝、Al-Mn系合金和Al-Mg-Si系合金，它们彼此间抗蚀性差别不大，一般不进行表面处理。而Al-Cu-Mg系和Al-Zn-Mg系合金需进行包铝或涂漆。还要注意热处理状态。如7×××超硬铝人工时效后具有良好的抗腐蚀开裂性能，2A12合金自然时效状态比人工时效状态抗蚀性好。

2）正确的结构设计　这是防止构件腐蚀的有效措施之

一。如避免不同金属接触，避免缝隙，避免高温点，不使应力过于集中。

3）表面涂层 如涂漆等。

4）阴极保护 安装牺牲阳极。

5）表面处理 表面阳极氧化处理和增厚阳极氧化膜等。

6）加缓蚀剂 如在铝容器的溶液中添加缓蚀剂。

7.4 变形铝及铝合金的性能比较（表2.2-32）

表2.2-31 工业变形铝合金的应力腐蚀等级比较

类 型	合 金 系	牌 号	状 态	SCC等级
热处理不可强化的铝合金	工业纯铝	1100、1200	各种	1
	Al-Mn	3003	各种	1
	Al-Mg	5005、5050、5154	各种	1
	Al-Mg	5056、5356	加工硬化	4
	Al-Mg-Mn	3004、3005、5454	各种	1
	Al-Mg-Mn	5086	各种	2
	Al-Mg-Mn	5083、5454	稳定化处理	2
	包铝的Al-Mn	3003、3004	各种	1
热处理可强化的铝合金	Al-Mg-Si	6063	各种	1
	Al-Mg-Si-Cu	6061	T4	2
	Al-Mg-Si-Cu	6061	T6	1
	Al-Si-Mg	6151、6351	T4	2
	Al-Si-Mg	6151、6351	T6	1
	Al-Si-Mg-Cu	6066、6070	T6	2
	Al-Cu	2219、2017	T3、T4	3
	Al-Cu	2219	T6、T8	2
	Al-Cu-Si-Mn	2014	T3、T6	3
	Al-Cu-Mg-Mn	2024	T3	3
	Al-Cu-Mg-Mn	2024	T6	2
	Al-Cu-Li-Cd	2020	T6	2
	Al-Cu-Fe-Ni	2618	T61	3
	Al-Cu-Pb-Bi	2011	T3	4
	Al-Cu-Pb-Bi	2011	T8	2
	Al-Zn-Mg	7005	T53	3
	Al-Zn-Mg	7039	T6	3
	Al-Zn-Mg-Cu	7075、7079	T6	3
	Al-Zn-Mg-Cu	7075、7079	T73	2
	包铝的Al-Zn-Mg-Cu	—	各种	1

注：在3%NaCl水溶液中进行交替浸渍试验所获得的结果。1表示在实验室与使用中都不会出现SCC；2表示在使用中不会出现SCC，但在实验室试验时，若向板材长横向施加拉应力，则有SCC；3表示使用中向板材短横向施加拉应力，都会出现SCC；4表示在使用中，在板材纵向及长横向施加拉应力都会出现SCC。

表2.2-32 变形铝合金性能比较

合金代号	加工性能		抗蚀性能		焊接性能			
	可塑性	可切削性	一般	应力腐蚀开裂	钎焊	气焊	电弧焊	接触点焊和线焊
1060	A	D-E	A	A	A	A	A	A-B
1050A	A	D-E	A	A	A	A	A	A-B
1100	A-B	D-E	A	A	A	A	A	A
5A02	B	C	A	A	A	A	A	A
5083	B	C	A	B	D	C	A	A
5056	A-B	C-D	A	B	D	C	A	A
3A21	A-B	D-E	A	A	A	A	A	A
2A70	D	B	D	C	D	D	C	B
2A14	C	B	D	C	D	D	B	B
6061	A-B	C-D	B	A	A	A	A	A
6063	B	C-D	A	A	A	A	A	A
7A09	D	B	C	C	D	D	C	B

注：A表示优；B表示良；C表示中等；D表示次等；E表示劣等。

编写：田荣璋（中南大学）
审稿：唐仁政（中南大学）

第3章 纯 铝

1 铝的性能

1.1 物理性能

铝的物理性能见表2.3-1。

表2.3-1 纯铝的物理性能

性 能	高纯铝(99.996%)	工业纯铝(99.5%)
原子序数	13	—
原子量	26.981 5	—
晶格常数(20℃)/nm	0.404 94	0.404
密度(20℃)/kg·m^{-3}	2 698	2 710
(700℃)/kg·m^{-3}	—	2 373
熔点/℃	660.2	约650
沸点/℃	2 060	—
熔解热/MJ·kg^{-1}	0.396 1	0.389 4
燃烧热/MJ·kg^{-1}	30.94	31.08
凝固体积收缩率/%	—	6.6
比热容(100℃)/J·(kg·K)$^{-1}$	934.92	964.74
热导率(25℃)/W·(m·K)$^{-1}$	235.2	222.6(O状态)
线胀系数(20~100℃)/10^{-6}K^{-1}	24.58	23.5
(100~300℃)/10^{-6}K^{-1}	25.45	25.6
弹性模量/MPa	—	70 000
切变模量/MPa	—	2 625
内摩擦(1 kHz)	—	约×10^{-3}
电导率/%IACS	64.94	59(O状态)
	—	57(H×8状态)
电阻率/nΩ·m (660℃)	24	20
(20℃)	26.548	29.22(O状态)
(20℃)	—	30.25(H×8状态)
电阻温度系数/nΩ·m·K^{-1}	0.1	0.1
体积磁化率/10^{-7}	6.27	6.26
磁导率/H·m^{-1}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
反射率①(λ=2 500×10^{-10} m)/%	—	87
(λ=5 000×10^{-10} m)/%	—	90
(λ=2 000×10^{-10} m)/%	—	97
折射率①(白光)	—	0.78~1.48
吸收率①(白光)	—	2.85~3.92
辐射能①(25℃,大气中)	—	0.035~0.06

① 与表面状态有关，所示数值是大致范围。

1.2 力学性能

不同纯度铝的典型力学性能见表2.3-2，铝纯度与强度和硬度的关系见图2.3-1和图2.3-2。

表2.3-2 纯铝退火状态的典型力学性能

w_{Al}/%	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/MPa	HBS	τ/MPa	σ_{-1}/MPa	E/GPa
99.99	45	10	50	13	—	—	62
99.8	60	20	45	15	—	—	—
99.7	65	26	—	—	—	—	—
99.6	70	30	43	19	50	20	—
99.5	85	30	30	—	55	—	69

注：τ为剪切强度；σ_{-1}为疲劳强度。

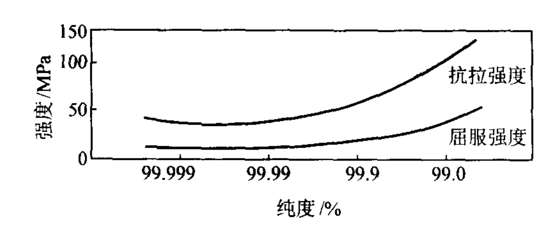


图2.3-1 铝的纯度与强度的关系

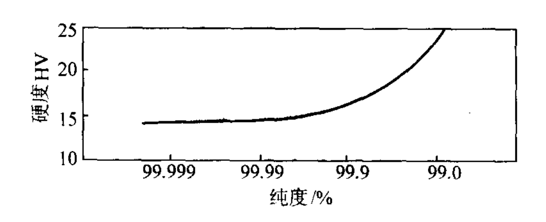


图2.3-2 铝的纯度与硬度的关系

1.3 化学性能

铝是电负性金属，其电极电位为-0.5~-3 V，99.99%纯铝在5.3%NaCl+0.3%H_2O_2溶液中对甘汞参比电极的电位为-0.87~+0.01 V。铝是最活泼的工业金属之一，由于表面上极易形成致密的连续的牢固的氧化膜（Al_2O_3），在许多氧化性介质、水、大气、部分中性溶液，许多的弱酸与强氧化性介质中，有相当高的稳定性。通常，氧化膜在pH=4.0~9.0的溶液中是稳定的，在浓硝酸（pH=1）和浓氢氧化铵溶液（pH=13）中也是稳定的。因此，凡是能改善氧化膜致密性、增加氧化膜厚度和提高氧化膜绝缘性能的因素，都有助于抗蚀性的提高。反之，凡是降低氧化膜有效保护作用的因素，不论是机械的还是化学的，都会使铝的抗蚀性下降。

2 杂质元素的影响

在纯铝中存在有两类杂质元素，一类是冶炼中带入的杂质，即在纯铝中无意加入或保留的金属或非金属元素。杂质分为有害杂质和无害（可能有益）杂质。无论有害或无害杂质，在各种牌号铝锭中都有严格规定，重熔用铝锭的化学成分国家标准GB/T 1196—2002见表2.3-3。另一类是在应用纯铝过程中带入的杂质，应尽量减少或防止杂质带入，带入允许量也应有规定。

杂质能提高纯铝的力学性能。除镁、锰以外，多数杂质

降低铝的抗蚀性。当纯铝作为导电材料时，应严格控制显著降低导电性的杂质，而保留能提高力学性能的元素。各种元素对纯铝导电性能的影响见图2.3-3。对纯铝密度、线胀系数和弹性模量的影响见图2.3-4～图2.3-6。

表2.3-3　纯铝的化学成分（摘自GB/T1196—2002）

牌号	化学成分（质量分数）/%							
	Al	杂质≤						
	≥	Fe	Si	Cu	Ga	Mg	其他每种	总和
Al99.85	99.85	0.12	0.08	0.005	0.030	0.030	0.015	0.15
Al99.80	99.80	0.15	0.10	0.01	0.03	0.03	0.02	0.02
Al99.70	99.70	0.20	0.13	0.01	0.03	0.03	0.03	0.30
Al99.60	99.60	0.25	0.18	0.01	0.03	0.03	0.03	0.40
Al99.50	99.50	0.30	0.25	0.02	0.03	0.05	0.03	0.50
Al99.00	99.00	0.50	0.45	0.02	0.05	0.05	0.05	1.00

注：1. 铝含量为100.00%与含量等于或大于0.010%的所有杂质总和的差值。

2. 表中未规定的其他杂质元素，如Zn，Mn，Ti等，供方可不做常规分析，但应定期分析。

3. 对于表中未规定的其他杂质元素的含量，如需方有特殊要求时，可由供需双方另行协议。

4. 分析数值的判定采用修约比较法，数值修约规定按GB/T 8170第3章的有关规定进行。修约数位与表中所列极限数位一致。

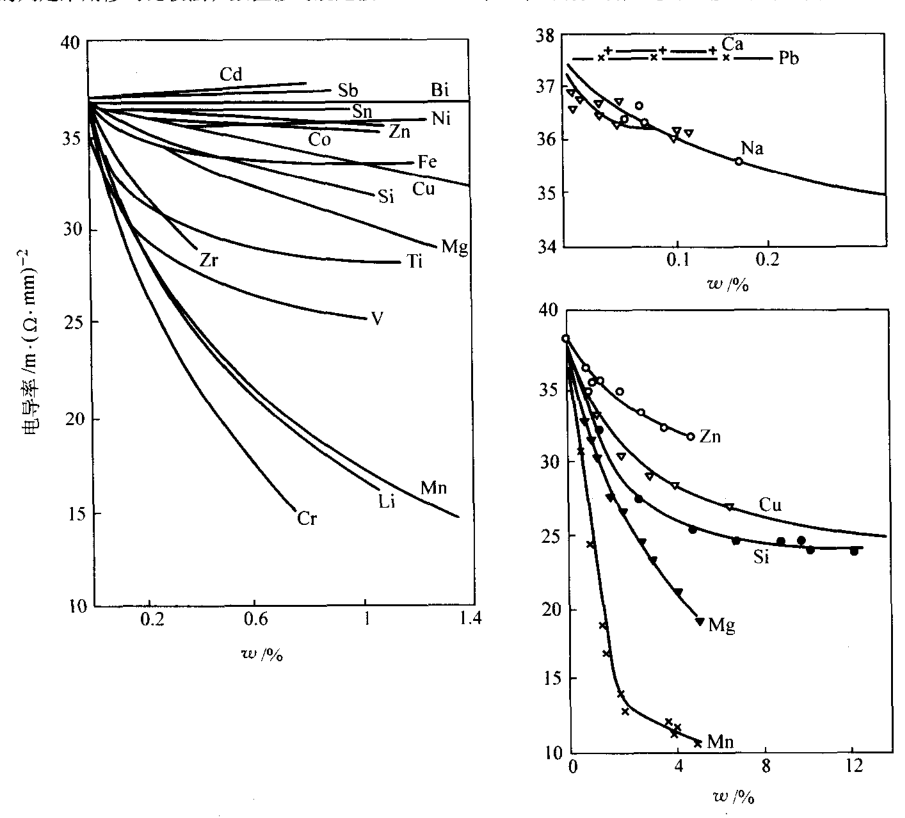


图2.3-3　合金元素和杂质对纯铝（99.99%）导电性能的影响

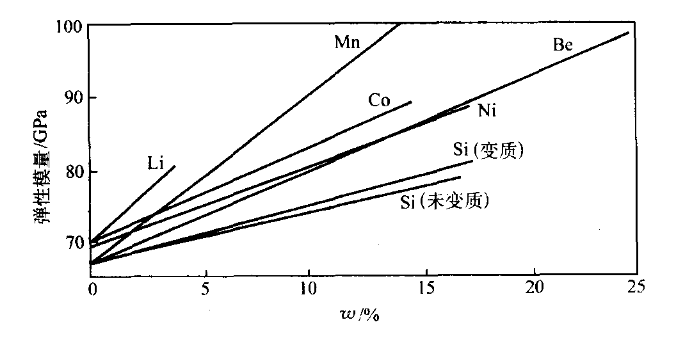


图2.3-4　杂质及合金元素对纯铝弹性模量的影响

Fe、Si是纯铝中的主要杂质，其含量相对比例（铁硅比）影响工艺性能和使用性能。例如，在工业纯铝中铁含量从0.001 7%增至1.0%时，其伸长率从36%降至14.3%；若硅含量从0.002 5%增至0.5%时其伸长率从36%降至24.5%。铁和硅对纯铝力学性能的影响见图2.3-7。当Fe、Si同时存在时，除形成$FeAl_3$及Si外，还有可能形成三元金属化合物α-（Fe_2SiAl_8）或β-（$FeSiAl_5$）。当Si＞Fe时往往形成β-（$FeSiAl_5$）相，该相在显微镜下呈亮咖啡色，是脆性很大的针状化合物，在应力作用下易沿该相断裂；但当Si＜Fe时，则形成α-（Fe_2SiAl_8）相，该相也是脆性化合物，但呈汉字形图案。由于Fe与Si的比例不同，α-（Fe_2SiAl_8）相可由包晶反应生产，也可以由液相直接形成。若Fe较多，α-

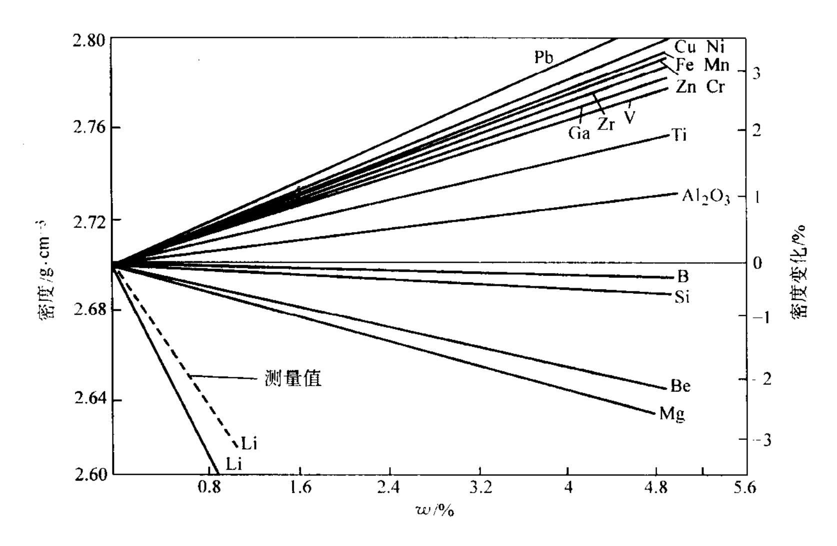


图 2.3-5 杂质及合金元素的含量对纯铝密度的影响（计算值）

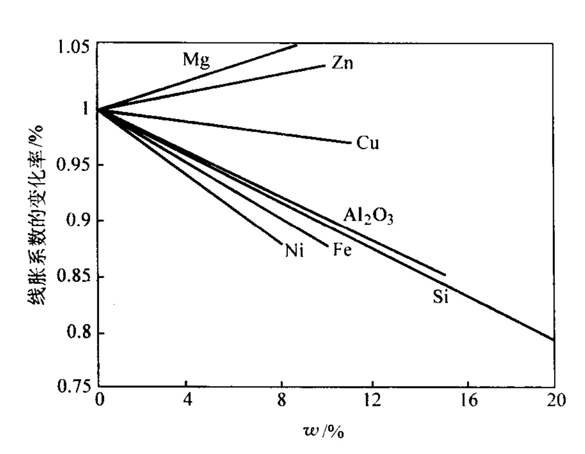


图 2.3-6 杂质及合金元素含量对高纯铝线胀系数的影响
（以 99.996% Al 的线胀系数为 1）

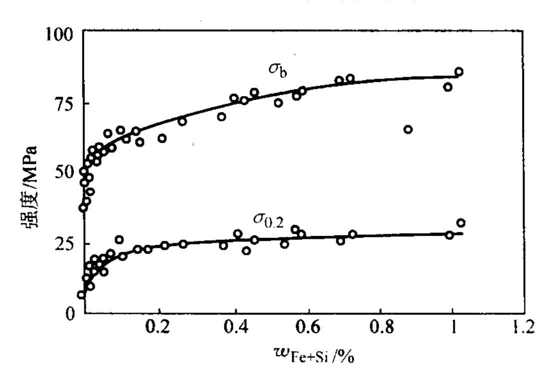


图 2.3-7 铁和硅对纯铝（O 状态）抗拉强度和屈服强度的影响

（Fe_2SiAl_8）相则由液相和 $FeAl_3$ 的包晶反应生成，是硬而脆的针状化合物，不但降低塑性而且还降低铝的抗蚀性。为了消除铝中这些结晶组织的影响，往往在高温（如 550℃）时进行锻、轧和长时间退火处理，以使针状组织破碎和粒状化。

Fe 和 Si 的相对含量不同，铸造过程中形成裂纹的倾向也不同。图 2.3-8 所示为 Al-Fe-Si 系成分与裂纹倾向关系图，图中的数字表示裂纹率，曲线的右下方裂纹倾向较大，而左上方裂纹倾向较小。位于曲线右下方的合金在 577℃共晶点时才结晶终了，而位于左上方的合金在 611℃温度的包晶点时结晶完毕，两者差 34℃，因此提高铁的含量使 Fe > Si 缩小了结晶温度范围，从而减少了铸造裂纹倾向性。Fe∶Si ≥ 2～3 的铝材，才有利于冲压。$FeAl_3$ 有细化再结晶晶粒的作用，降低抗蚀性，当有 Mn 存在时，Fe 可溶入 Al_6Mn 中形成 Al_6（MnFe）相，减少 Fe 的有害作用。

工业生产实践表明：工业纯铝中 Fe + Si ≈ 0.65% 时，要防止铸造裂纹必须使 Fe > Si；但当 Fe、Si 含量更高时，即使 Si > Fe 也可能不会产生裂纹。

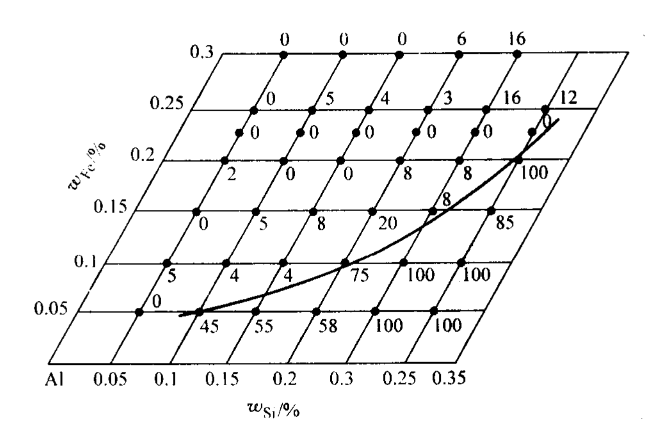


图 2.3-8 工业纯铝中铁、硅含量与裂纹倾向性的关系
（图中数字表示裂纹率）

编写：张新明（中南大学）
林 林（中南大学）
审稿：唐仁政（中南大学）

第4章 1××× 系铝合金

1 概述

1×××系铝合金的牌号和成分见本篇第1章表2.1-15。

这里所讲的1×××系铝合金包括两部分内容，其一是非合金变形铝，控制的是杂质极限；其二是变形铝合金，不但要控制杂质限量，还要添加少量合金元素以满足工业的不同要求。国际注册的1×××系铝合金有40余个牌号，我国国家标准GB/T 3190—1996中列人22余个牌号。它们具有各自的成分、状态和组织、力学性能、物理性能、热学性能、被切削性能、焊接性能、抗蚀性能和成形加工性能等，各自有其特定的用途。

2 合金各论

2.1 1199合金

2.1.1 成分和组织

1199合金为工业纯铝中纯度最高的铝合金，含铝量不小于99.99%，其特点是传热导电性能和塑性变形能力好，工艺性能与工业纯铝差别很大，室温也可再结晶，容易引起晶粒粗大，熔炼时易受杂质污染，因而给加工带来许多困难。主要用于科学研究、化工工业以及其他特殊用途。

合金成分见本篇第1章表2.1-15，合金组织为单相α (Al)。

2.1.2 力学性能

室温力学性能见表2.4-1。

表2.4-1 1199合金室温力学性能

冷变形程度 ε/%	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%
0（退火状态）	10	45	50
10	57	59	40
20	75	77	15
40	94	96	11
60	105	110	6
75	113	120	5

2.1.3 物理性能

1）密度（20℃）：2 705 kg/m³。

2）热学性能见表2.4-2。

表2.4-2 1199合金热学性能

液相线温度/℃	固相线温度/℃	线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$		体胀系数(20℃)/$10^{-6}K^{-1}$	比热容(25℃)/J·$(kg·K)^{-1}$	热导率(20℃)/W·$(m·K)^{-1}$	
		温度/℃	平均值			O状态	H18状态
660	660	-50~20	21.8	68.1	900	243	—
		20~100	23.6				
		20~200	24.5				
		20~300	25.5				

3）电学性能　O状态的等体积电导率（20℃）为64.5%IACS，电阻率（20℃）为26.7 μΩ·m，电阻温度系数为0.1 μΩ·m/K。

4）光学性能　电解抛光表面对可见光的反射率为85%~90%。

2.1.4 切削性能

1199合金切削性能不好。切屑呈连续状且易黏结在刀尖上。随着加工硬化程度提高，可切削性能有所改善。可以干切削，亦可用猪油或猪油和煤油的混合物作切削液。

2.1.5 焊接性能

1199合金可焊性十分良好。钎焊、电阻焊、电弧焊都能很好地焊接，但O状态采用电阻焊时技术要求较高。

2.1.6 抗蚀性能

1199合金在大气中，包括在工业性大气和海洋性大气中，均有较好的耐蚀性。在浓硝酸（80%以上）中的稳定性优于镍铬系不锈钢。在淡水、海水、中性溶液、有机酸、发烟硫酸中耐蚀性好，优于其他牌号铝合金。盐酸和碱会破坏Al_2O_3保护膜，因而对盐酸和碱溶液不耐蚀。1199合金无应力腐蚀开裂倾向。

2.1.7 主要用途

主要用于电解电容箔，光子反光沉积膜。

2.2 1060合金

2.2.1 成分和组织

1060合金属普通工业纯铝，含铝量不小于99.60%。其特点是：强底低，加工硬化是惟一的强化途径。热加工和冷加工性能良好，导热导电率高，抗蚀性能优良。广泛用于要求成形性能良好、抗蚀、可焊的工业设备，其成分见本篇第1章表2.1-15。

组织为单相α (Al)，可能的杂质相为$FeAl_3$、α-(Fe_2SiAl_8)、β-($FeSiAl_5$)，在杂质含量允许范围内，应使Fe>Si，否则容易引起铸造裂纹。应控制铜的含量，否则会损害抗蚀性。

2.2.2 力学性能

1060合金力学性能见表2.4-3和表2.4-4。

表2.4-3 1060合金室温力学性能

状态	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%	硬度 HBS	抗剪强度 /MPa	疲劳强度 /MPa
O	28	69	43	19	48	21
H12	76	83	16	23	55	28
H14	90	97	12	26	62	34
H16	103	110	8	30	69	45
H18	124	131	6	35	76	45

2.2.3 物理性能

1）密度（20℃）为2.705 g/cm³。

2）热学性能见表2.4-5。

表 2.4-4 1060合金的拉伸力学性能极限

产品与状态	$\sigma_{0.2min}$ /MPa	σ_b/MPa max	σ_b/MPa min	$\delta_{min}^{①}$/%
板 材				
O	17	95	55	15~25
H12	62	110	75	6~12
H14	70	115	83	1~10
H18	83	—	110	1~4
H112				
厚6.4~12.6 mm	—	—	75	10
厚12.7~25.4 mm	—	—	70	20
厚25.43~76.2 mm	—	—	62	25
拉伸管（壁厚0.254~0.127 mm）				
O	17	—	58	—
H12	28	—	70	—
H14	70	—	83	—
H18	90	—	110	—
H112	17	—	50	—
挤压管				
O	17	95	58	—
H112	17	95②	58	30②
热交换管（壁厚0.25~5.0 mm）				
H14	70	—	83	—

① 标距50 mm或4*d*（*d*为试样工作部分直径），本栏如列有数值范围的，表示伸长率的最低值随板材厚度而变化；

② 仅适用于直径25.4~114.3 mm、壁厚1.27~4.29 mm的管材。

3）电学性能　电导率（20℃,%IACS）：O状态下等体积的为62，等质量的为204，H18状态下等体积的为61，等质量的为201。电导率（20℃，$\mu\Omega\cdot m$）：O状态下为27.8，H18状态下为28.3。电阻温度系数（20℃）为：0.1 $\mu\Omega\cdot m/K$。在每升含（53g NaCl+3g H_2O_2）的水溶液中，以0.1 mol/L甘汞电极作标准电极测得的电极电位为-0.84 V。

2.2.4 切削性能

1060合金切削性能不好，但随着加工硬化程度的增加，切削性能逐渐得到改善，该材料被切削时，切削阻力小，切屑呈连续状。要得到满意的切削效果，材料应处于充分的硬化状态，且切削刀具应保持光洁、锋利，最好经过研磨。如果使用高速钢刀具，刃部轮廓可采用如下参数：前倾角45°~52°，横向前角12°~18°，横向后角8°~10°，切削角30°~35°。如果采用硬质合金刀具，切削效果更佳。刃部形状大致可以采用上述参数。1060合金可以干切削，但大的工件或表面品质要求高时，可用纯猪油或猪油和煤油的混合油作切削液。

2.2.5 焊接性能

1060合金的焊接性能良好。采用钎焊、气焊、电弧焊、电阻焊、固态焊等方法都能进行很好的焊接。该合金焊接裂纹敏感性低，但即使这样也应注意纯铝的凝固收缩量比铝合金大的问题，焊接工艺不妥当时，容易产生气孔。气焊时应采用适当的焊剂以造成弱还原性焊焰。当退火状态的材料进行电阻焊时，要严格遵守操作规程，操作者应有高的焊接技术。最好采用氩弧焊。1060合金也用作焊条。

2.2.6 抗蚀性能

1060合金对于一般的大气腐蚀有着极好的抗蚀性，可以无须保护地在工业性和海洋性大气中使用。对于淡水、海水以及中性溶液（pH=4~8）也抗蚀。在有机酸、发烟硫酸、浓硝酸中抗蚀性良好，特别是在80%以上的浓硝酸中稳定性极高，甚至优于镍铬系不锈钢。但对于盐酸和碱性溶液，由于Al_2O_3保护膜遭到破坏，因而不抗蚀。1060合金无应力腐蚀开裂倾向。

表 2.4-5 1060合金热学性能

液相线温度/℃	固相线温度/℃	线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$ 温度/℃	线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$ 平均值	体胀系数(20℃) /$10^{-6}K^{-1}$	比热容(20℃) /J·(kg·K)$^{-1}$	热导率(20℃)/W·(m·K)$^{-1}$ O状态	热导率(20℃)/W·(m·K)$^{-1}$ H18状态
657	646	-50~20	21.8	68	900	243	—
		20~100	23.6				
		20~200	24.5				
		20~300	25.5				

2.2.7 工艺参数

1060合金的退火温度为345℃；挤压温度为320~480℃。

2.2.8 主要用途

广泛用作化工设备、船舶设备、铁道油罐车、过氧化氢（H_2O_2）储罐，以及各种强度要求不高，但要求加工性能良好、抗蚀、可焊的工业设备的材料，也可作为电导体材料、仪器仪表材料和焊条。

2.3 1050合金

2.3.1 成分和组织

1050合金为普通工业纯铝，含铝量不小于99.50%，铁和硅为主要杂质。具有工业纯铝的普遍特点：强度低、塑性高、抗腐蚀、易焊接，特别是导热导电性能好。由于1050合金比1060合金纯度稍低，因而强度稍高。但导电性能几乎相等，达62%IACS，相当于等质量铜的导电率的两倍。也可作抗蚀、可焊，强度要求不高的工业设备和仪器、仪表的材料等。

1050合金成分见本篇第1章表2.1-15。

组织为单相α(Al)，可能的杂质相为$FeAl_3$、α-(Fe_2SiAl_8)、β-($FeSiAl_5$)。

铁和硅为主要杂质，含量过高会降低导电性能和抗蚀性。应控制铁和硅的比例，否则易产生铸造裂纹。钒、锰、钛等杂质应严格控制，因为它们严重损害导电性能。

2.3.2 力学性能

1050合金力学性能见表2.4-6。

表 2.4-6 1050合金室温力学性能

状态	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%	抗剪强度/MPa
O	28	76	39	62
H14	103	110	10	69
H16	124	131	8	76
H18	145	159	7	83

2.3.3 物理性能

1）密度（20℃）为2.705 g/cm^3。

2）热学性能见表2.4-7。

表 2.4-7 1050合金热学性能

液相线温度/℃	固相线温度/℃	线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$		体胀系数(20℃)/$10^{-6}K^{-1}$	比热容(20℃)/J·(kg·K)$^{-1}$	热导率(20℃)/W·(m·K)$^{-1}$	
		温度/℃	平均值			O状态	H18状态
657	646	-50~20	21.8	68.1	900	243	—
		20~100	23.6				
		20~200	24.5				
		20~300	25.5				

3) 电学性能 电导率（20℃,%IACS）：O状态下等体积的为61.3，等质量的为204。电阻率（20℃，μΩ·m）：O状态的为28.1。电阻温度系数（20℃）为：0.1 μΩ·m/K。

2.3.4 切削性能

1050合金软状态切削性能不好，硬状态时稍好。切削阻力小，切屑呈连续状。切削刀可采用高速钢或硬质合金。刃部轮廓参数：前倾角45°~52°，横向前角12°~18°，横向后角8°~10°，切削角30°~35°。该合金可以干切削。表面品质要求高时，可用纯猪油或猪油和煤油的混合油作切削液。

2.3.5 焊接性能

1050合金的焊接性能良好。钎焊、气焊、氩弧焊性能良好。电阻焊时需要采用特殊工艺，对操作者技术要求较高。硬状态时各种焊接方法都能很好地焊接。它也可作为焊条使用。

2.3.6 抗蚀性能

1050合金有良好的耐大气腐蚀（包括工业性大气和海洋性大气）的能力。对淡水、海水、酒精、汽油、有机酸、中性无机盐水溶液有好的抗蚀性。对无机酸的抗蚀性取决于酸的浓度，对发烟硫酸、浓硝酸耐蚀，但不耐盐酸腐蚀。对碱性溶液不耐蚀。无应力腐蚀开裂倾向。

2.3.7 工艺参数

热加工温度350~450℃，退火温度345℃。

2.3.8 主要用途

可加工成不同规格的管、棒、线、板、带和箔材等。

该合金主要用作食品、化学和酿造工业挤压盘、管，各种软管，烟花粉，电导体，化工设备和小五金等。

2.4 1100合金

2.4.1 成分和组织

1100合金是含铝量为99.0%的普通工业纯铝。不可热处理强化；强度低，但有良好的热加工和冷加工性能。抗蚀性和焊接性能良好。阳极氧化后可进一步提高其抗蚀性，同时可获得美观的表面。由于有着上述优良的综合特性，而纯度又是工业纯铝中较低者，因而被广泛地应用于从炊具到工业设备的各个领域。

1100合金成分见第1章表2.4-15。

组织为单相α(Al)，可能的杂质相为$FeAl_3$、α-(Fe_2SiAl_8)、β-($FeSiAl_5$)。

铁和硅为主要杂质，应控制铁和硅的比例，否则易产生铸造裂纹和降低塑性。铜含量过高会损害抗蚀性。

2.4.2 力学性能

室温力学性能见表2.4-8。

表 2.4-8 1100合金室温力学性能

状态	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%	硬度HBS	抗剪强度/MPa	疲劳强度/MPa
O	34	90	35	23	62	34
H12	104	110	12	28	69	41
H14	117	124	9	32	76	48
H16	138	145	6	38	83	60
H18	152	165	5	44	90	62

不同温度下的力学性能见表2.4-9。

表 2.4-9 1100合金在不同温度的力学性能

温度/℃	O			H14			H18		
	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%
-195	41	170	50	140	205	45	180	235	30
-80	38	105	43	125	140	24	160	180	16
-28	34	97	40	115	130	20	160	170	16
24	34	90	40	115	125	20	150	165	15
100	32	69	45	105	110	20	130	145	15
149	29	55	55	83	97	23	97	125	20
204	24	41	65	52	69	26	24	41	65
260	18	28	75	18	28	75	18	28	75
316	14	20	80	14	20	80	14	20	80
371	11	14	85	11	14	85	11	14	85

1100合金的拉伸力学性能极限见表2.4-10。

2.4.3 物理性能

1) 密度（20℃）为2.71 g/cm³。

2) 热学性能见表2.4-11。

3) 电学性能 电导率（20℃,%IACS）：O状态下等体积的为59，等质量的为194；H19状态下等体积的为57，等质量的为187。电阻率（20℃，μΩ·m）；O状态下为29.2，H18状态下为30.2。电阻温度系数（20℃）为0.1μΩ·m/K。在25℃，在每升含（53g NaCl + 3g H_2O_2）的水溶液中，以0.1 mol/L甘汞电极作标准电极测得的电极电位为-0.83 V。

表 2.4-10 1100合金的拉伸力学性能极限

产品与状态	$\sigma_{0.2min}$ /MPa	σ_b/MPa		$\delta_{min}^{①}$/%
		max	min	
板 材				
O	25	105	85	15~28
H12	75	130	95	3~12
H14	95	145	110	1~10
H16	115	165	130	1~4
H18	—	—	150	1~4
H112				
厚6.4~12.6 mm	50	—	90	9
厚12.7~25.4 mm	35	—	83	14
厚25.43~76.2 mm	30	—	80	20
线、棒材（轧制的或冷精整的）				
O	20	105	75	25
H112	20	—	75	—
H12②	—	—	95	—
H14②	—	—	110	—
H16②	—	—	130	—
H18②	—	—	150	—
挤压的线、棒材与型材				
O	20	105	75	25
H112	20	—	75	—
线、棒材（铆钉与冷镦头产品用）				
O③	—	105	—	—
H14③	—	145	110	—
拉伸管（壁厚0.36~12.7 mm）				
O	—	105	—	—
H12	—	—	95	—
H14	—	—	110	—
H16	—	—	130	—
H18	—	—	150	—
挤压管材				
O	20	105	75	25
H112	20	—	75	25

① 标距50 mm或4d（d为试样工作部分直径），本栏如列有数值范围的，表示伸长率的最低值随板材厚度而变化；
② ≤9.5 mm的板材；
③ 直径≤25.4 mm的标定材料。

4）光学性能 机械抛光或化学抛光的1100合金对白炽灯光的反射率为86%，对波长为250 nm光的反射率为84%。

2.4.4 切削性能

在纯铝中1100合金的切削性能相对较好。切削阻力小，切屑连续，易黏刀。对硬状态材料，采用合适的刀具和工艺，可获得好的效果。可用高速钢或硬质合金刀具，后者效果更佳。刀具刃部轮廓参数：前倾角45°~52°，横向前角12°~18°，横向后角8°~10°，切削角30°~35°。刃口应光洁、锋利。该合金可以干切削，也可采用纯猪油或猪油和煤油的混合油作为切削液。

2.4.5 焊接性能

1100合金可焊性优良，采用钎焊、气焊、电弧焊、电阻焊、固态焊（如冷压焊、爆炸焊、扩散焊）等方法都能很好地焊接。在自然环境中，焊缝几乎不存在腐蚀问题，但对于浓度小于80%的硝酸介质，可能产生焊缝腐蚀。1100合金也可作为焊条材料使用。

2.4.6 抗蚀性能

1100合金在农村、工业区、海洋性大气中均有很好的抗蚀能力，对淡水、海水、许多食品、有机酸、酒精、汽油、氨水、中性无机盐水溶液均耐蚀，其原因是能生成Al_2O_3钝化膜，使电极电位显著地变化。对于盐酸和碱性溶液，由于Al_2O_3保护膜遭到破坏，所以不耐蚀。1100合金无应力腐蚀开裂倾向。

1100合金与3003合金有着同一水平的抗蚀性。

2.4.7 工艺参数

1100合金的退火温度为345℃，热轧温度350~450℃，挤压温度320~480℃。

2.4.8 主要用途

可将该合金加工成不同规格的管、棒、线、板、带和箔等。

主要用于加工需要有良好的成形性和高的抗蚀性，但不要求有高强度的零部件，例如化工产品、食品工业装置与储存容器、薄板加工件、深拉或旋压凹形器皿、焊接零部件、热交换器、印刷板、铭牌、反光器具等。

2.5 1145合金

2.5.1 成分和组织

1145合金的成分见本篇第1章表2.1-15。其组织为单相α(Al)，可能有其他相$FeAl_3$、α-(Al_2SiFe_8)和β-(Al_5FeSi)。

2.5.2 力学性能

典型室温力学性能见表2.4-12。

表 2.4-11 1100合金热学性能

合金	液相线温度/℃	固相线温度/℃	线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$		体胀系数(20℃)/$10^{-6}K^{-1}$	比热容(20°)/J·(kg·K)$^{-1}$	热导率(O状态)/W·(m·K)$^{-1}$
			温度/℃	平均值			
1050	657	646	-50~20	21.8	68.1	904	231
			20~100	23.6			
			20~200	24.5			
			20~300	25.5			

表 2.4-12 典型室温力学性能

状态	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%
O	34	75	40
H18	117	145	5

注：表内为0.02~0.15 mm厚度的素箔性能。

2.5.3 物理性能

1）密度（20℃）为2.705 g/cm³。
2）热学性能见表2.4-13。
3）电学性能见表2.4-14。

2.5.4 工艺参数

轧制温度290~500℃，挤压温度250~450℃，低温退火温度210~260℃，完工退火温度310~410℃。

表 2.4-13　1145 合金热学性能

液相线温度 /℃	固相线温度 /℃	线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$		体胀系数（20℃） /$10^{-6}K^{-1}$	比热容（20°） /J·(kg·K)$^{-1}$	热导率（20℃） /W·(m·K)$^{-1}$
		温度/℃	平均值			
657	646	-50~20 20~100 20~200 20~300	21.8 23.6 24.5 25.5	68	904	O 状态 230 H18 状态 227

表 2.4-14　1145 合金电学性能

状态	体积电导率(20℃) /%IACS	电阻率(20℃) /nΩ·m	电阻温度系数(20℃) /(nΩ·m)·K^{-1}
O	61	28.1	0.1
H18	60	—	—

2.5.5　主要用途

制作包装及绝热铝箔、热交换器等。

2.6　1350 合金

2.6.1　成分和组织

1350 合金成分见本篇第 1 章表 2.1-15。其组织为 α(Al)，可能有其他相 $FeAl_3$、α-(Al_2SiFe_8)、β-(Al_5FeSi)和 $TiAl_3$ 等。

2.6.2　力学性能

拉伸力学性能见表 2.4-15，线材拉伸性能见表 2.4-16。

表 2.4-15　1350 合金的拉伸力学性能极限

产品与状态	$\sigma_{0.2min}$ /MPa	σ_b/MPa		$\delta_{min}^{①}$/%
		max	min	
板　材				
O	—	95	55	15~28
H12	—	115	83	3~12
H14	—	130	95	1~10
H16	—	145	110	1~4
H18	—	—	125	1~4
H112				
厚 6.4~12.6 mm	—	—	75	10
厚 12.7~25.4 mm	—	—	70	16
厚 25.43~38.1 mm	—	—	62	22
线材②和拉伸棒③				
O	—	95	58	—
H12、H22	—	115	83	—
H14、H24	—	140	105	—
H16、H26	—	250	115	—
挤压材料④				
H111	25	—	58	—
轧制棒材⑤				
H12	55	—	83	—

续表 2.4-15

产品与状态	$\sigma_{0.2min}$ /MPa	σ_b/MPa		$\delta_{min}^{①}$/%
		max	min	
由轧制板锯成的棒				
H112				
厚 3.2~12.6 mm	40	—	75	—
厚 12.7~25.4 mm	28	—	70	—
厚 25.43~38.1 mm	25	—	62	—

① 标距 50 mm 和 4*d*（*d* 为试样工作部分的直径），本栏如列有数值范围的，表示伸长率的最低值随板材厚度而变化；
② ≤9.50 mm 的材料；
③ 直径 9.52 mm；
④ 棒、管与结构型材；
⑤ 厚 3~25 mm。

表 2.4-16　1350-H19 合金线材的拉伸性能极限

线径/mm	σ_{bmin}/MPa		$\delta_{min}^{③}$/%	
	任一试样①	平均值②	任一试样①	平均值②
0.27~1.27	160	172	—	—
>1.27~1.52	185	200	1.2	1.4
>1.52~1.78	185	195	1.3	1.5
>1.78~2.03	183	193	1.4	1.6
>2.03~2.29	180	190	1.5	1.6
>2.29~2.54	175	185	1.5	1.6
>2.54~2.79	170	180	1.5	1.6
>2.79~3.05	165	175	1.6	1.7
>3.05~3.56	162	170	1.7	1.8
>3.56~3.81	162	172	1.7	1.9
>3.81~4.57	160	165	1.9	2.0
>4.57~5.33	160	165	2.0	2.1
>5.33~6.60	155	162	2.2	2.3

① 从一批材料任取一个试样的最小值；
② 一批材料所取试样的平均值；
③ 试样标距长 250mm。

2.6.3　物理性能

1）密度（20℃）为 2.705 g/cm³。
2）热学性能见表 2.4-17。

表 2.4-17　1350 合金热学性能

液相线温度 /℃	固相线温度 /℃	线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$		体胀系数（20℃） /$10^{-6}K^{-1}$	比热容（20°） /J·(kg·K)$^{-1}$	热导率（20℃） /W·(m·K)$^{-1}$
		温度/℃	平均值			
657	646	-50~20 20~100 20~200 20~300	21.8 23.6 24.5 25.5	68	900	O 状态 234 H19 状态 230

3）电学性能见表2.4-18。

表2.4-18 1350合金电学性能

状态	20℃体积电导率 /%IACS	20℃电阻率 /nΩ·m	20℃电阻温度系数 /（nΩ·m）·K^{-1}
O	61.8	27.9	0.1
H1X	60.0	28.2	0.1

2.6.4 工艺参数

轧制温度290～500℃，挤压温度250～450℃，低温退火温度210～260℃，完全退火温度310～410℃。

2.6.5 主要用途

制作电线、导电绞线、汇流排、变压器带材等。

编写：张新明（中南大学）
林 林（中南大学）
审稿：唐仁政（中南大学）

第5章 2×××系铝合金

1 概述

2×××系合金为Al-Cu-(Mg)系合金，过去称为硬铝，现在将过去称为锻铝的2A50、2B50、2A70、2A80、2A90和2A14，也归2×××系合金，这是个进步。

Al-Cu-Mg系三元合金（其他添加元素暂不考虑）除了有θ（$CuAl_2$）和β（Mg_2Al_3）相外，还有两个三元相S（Al_2CuMg）和T（Al_6CuMg_4）相。其中S相强化效果最大，θ相次之，β和T相的强化效果较弱。从主要成分来看，实用的2×××系合金主要强化相是θ和S相。当Cu/Mg = 2.61时，合金中强化相几乎全是S相。Cu含量高，S相少而θ相多；Mg含量高，θ相少而S相多。工业用2×××系合金中，Cu/Mg≥8时，主要强化相是θ相；Cu/Mg = 8~4时，主要强化相是θ+S相；Cu/Mg = 4~1.5时，主要强化相是S相。

Mn是2×××系合金组成部分，其主要作用是消除Fe的有害作用和抑制挤压和固溶处理时的再结晶过程。加少量Ti是为了细化铸造组织，降低铸锭热裂倾向性。

Fe和Si一般是2×××系合金（确切地说是硬铝）的杂质。但Mg含量小于1%，Si>0.5%时，能提高人工时效的速度和强度，又不影响自然时效能力。此时Si与Mg形成Mg_2Si相，有利于人工时效。称为锻铝的一些合金，如2A50、2B50和2A14合金中都加有一定量的Si。含Fe量增加，形成不溶解的化合物，损害时效能力、降低强度和韧性。2A70、2A80和2A90合金是耐热合金，因为加有Ni和Fe，Fe/Ni≈1时形成$FeNiAl_9$化合物。Ni多还会形成AlCuNi化合物；Fe多又会形成Al_7Cu_2Fe化合物。2A70合金中含Fe和Ni相当，其主要相组成物为α（Al）+S（Al_2CuMg）+$FeNiAl_9$。2A70和2A80合金含θ相少，没有自然时效能力，只能人工时效。

2A16、2B16、2A17、2A20、2219合金中，除2A17合金中含少量Mg（0.25%~0.45%）外，其余合金实际上均不含Mg，都加有一定数量的Mn，即为Al-Cu-Mn系耐热铝合金。其主要相组成物为α（Al）+θ（$CuAl_2$）+T（$Al_{12}Mn_2Cu$）。合金含Cu大于6%，已超过Cu在Al中的溶解度极限(5.7%)，过剩的θ（$CuAl_2$）相弥散质点能提高合金的耐热性。加Mn形成T（$Al_{12}Mn_2Cu$）相，除提高耐热性以外，T相在时效过程中形核长大极为缓慢，使合金在高温下长时间加热，组织性能保持稳定（耐热）。

加Ti细化晶粒，提高再结晶温度。有的合金（如2219合金）还加Zr、V等元素，也能提高再结晶温度和α（Al）固溶体稳定性。

Fe和Si对耐热性是有害杂质。

2×××系合金是铝合金中应用最广泛，用量最大，产品种类最多的合金系。国际注册有近60个牌号。我国国家标准中有近40个牌号，其牌号及成分见本篇第1章表2.1-15。

2 合金各论

2.1 2A01合金

2.1.1 成分和组织

2A01合金为Al-Cu-Mg系铆钉硬铝，主要产品为铆钉线材。铆钉材料的生产和使用都要求其具有很好的塑性，因此合金元素和杂质的含量都控制得比较严格。该合金在冷、热状态下都有良好的塑性，自然时效状态下的力学性能最好。抗蚀性较差，需要进行保护处理。2A01铆钉在淬火时效状态下使用，用于铆接中等强度工作温度不超过100℃的结构材料。

其主要成分为：w（Cu）2.2%~3.0%，w（Mg）0.20%~0.50%，详细成分见本篇第1章表2.1-15。

主要相组成物为α（Al）、θ（$CuAl_2$）、S（Al_2CuMg）。铜和镁为主要合金元素，生成强化相θ和S，由于含镁量不高，S相甚少，所以耐热性也不高。可能的杂质相为Mg_2Si、α-（Fe_2SiAl_8）、Al_7Cu_2Fe等。

2.1.2 物理性能

1）热学性能 热导率见表2.5-1，比热容见表2.5-2，线胀系数见表2.5-3。

表2.5-1 热导率

温度/℃	25	100	200	300	400
λ/W·(m·K)$^{-1}$	163	172	180	184	193

表2.5-2 比热容

温度/℃	100	200	300	400
c/J·(kg·K)$^{-1}$	921	1 005	1 089	1 172

表2.5-3 线胀系数

温度/℃	-50~20	20~100	20~200	20~300
α/10^{-6}K^{-1}	21.8	23.4	24.5	25.2

2）密度（20℃）为2.76 g·cm^{-3}。

3）电性能 电阻率（ρ）为39 nΩ·m。

4）磁性能 无磁性。

2.1.3 力学性能

1）技术标准规定的性能见表2.5-4。

表2.5-4 力学性能

技术标准	品种	试样状态	d/mm	τ/MPa≥
GB/T 3196—2001	线材	T4	1.6~10	185
GJB 2055—1994	线材	T4	1.6~10	186

2）室温及各种温度下的力学性能

① 硬度 T4状态线材，70HBS；O状态线材，38HBS。

② 室温拉伸性能 见表2.5-5。

表2.5-5 室温拉伸性能

品种	试样状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_{10}/%
线材	T4	294	167	24
	O	157	59	24

③ 各种温度下的拉伸性能见表2.5-6。

④ 室温剪切性能 合金线材的室温抗剪强度τ = 196 MPa。

⑤ 高温剪切性能 见表2.5-7。

表 2.5-6 各种温度下的拉伸性能

品种	试样状态	d/mm	温度/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_{10}/%	ψ/%
线材	T4	8	20	294	167	24	60
			100	255	—	24	63
			150	226	—	22	66
			200	186	—	26	69

表 2.5-7 高温剪切性能

品种	试样状态	d/mm	温度/℃	τ/MPa	品种	试样状态	d/mm	温度/℃	τ/MPa
线材	T4	8	20	206	线材	T4	8	200	137
			100	177				250	108
			150	167				300	59

3）弹性性能 弹性模量 $E=70$ GPa，切变模量 $G=27$ GPa。

2.1.4 抗蚀性

2A01合金的抗蚀性属中等，但有良好的抗应力腐蚀的能力。该合金的抗蚀性与热处理状态有关，淬火自然时效状态下抗蚀性最好，淬火时冷却速度小会降低合金的抗蚀性，使用时温度超过100℃时会出现晶间腐蚀。

2.1.5 铆接性能

2A01合金铆钉应在淬火自然时效状态下铆接，不受自然时效后至铆接时停留时间的限制，但不能在淬火后立即铆接，否则会降低铆钉的抗拉强度。

2.1.6 工艺参数

熔炼温度720～750℃；铸造温度700～730℃；挤压温度320～450℃，锻造温度350～520℃；典型退火处理415℃，2～3 h；淬火温度500℃±5℃，自然时效4 d以上。

热状态和冷状态成形性能都很好。

2.1.7 品种和用途

主要产品为线材。用作工作温度不超过100℃的结构件铆钉。

2.2 2A02合金

2.2.1 成分和组织

2A02合金属Al-Cu-Mg系耐热硬铝。该合金的特点是，有较好的耐热性，可在不高于300℃的温度下使用。可热处理强化，热状态下塑性好，挤压半成品有形成粗晶环的倾向，抗蚀性不高，有应力腐蚀开裂倾向。可以焊接，切削性能良好。可用作压气机叶片、叶轮等，但在新型发动机中已为其他合金所代替。

其主要成分（质量分数）为：Cu=2.6%～3.2%，Mg=2.0%～2.4%，Mn=0.45%～0.70%。详细成分见本篇第1章表2.1-15。

主要相组成物为α(Al)和S(Al_2CuMg)。铜和镁为主要合金化元素，铜与镁之比大约为1.32时，平衡状态下只出现S相。锰能提高再结晶温度和耐热性，但由于含量不高，使挤压件容易出现粗晶环。可能的杂质相为Mg_2Si、$MnAl_6$、Al_7Cu_2Fe等。

2.2.2 物理性能

1）热学性能 热导率见表2.5-8，比热容见表2.5-9，线胀系数见表2.5-10。

表 2.5-8 热导率

温度/℃	25	100	200	300	400
λ/W·(m·K)$^{-1}$	134	142	151	159	172

表 2.5-9 比热容

温度/℃	100	150	200	250	300	350	400
c/J·(kg·K)$^{-1}$	837	879	921	921	921	963	963

表 2.5-10 线胀系数

温度/℃	20～100	20～200	20～300	100～200	200～300	300～400
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	23.6	24.1	25.1	24.6	26.7	27.5
	23.6	25.2	26.0	24.8	26.2	26.9

2）密度（20℃）：2.75 g/cm^3。

3）电性能 电阻率（20℃）为55 nΩ·m。

4）磁性能 无磁性。

2.2.3 力学性能

1）技术标准规定的性能见表2.5-11。

2）室温及各种温度下的力学性能

表 2.5-11 力学性能

技术标准	品种	D/mm	试样状态	试样方向	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ/%	HBS
					≥			
GB/T 3191—1998	挤压棒材	所有直径	T6	纵向	430	275	10	—
GJB 2054—1992 HB 5202—1982	挤压棒材	≤240	T6	纵向	430	275	10	—
GJB 2351—1995 HB 5204—1982	自由锻件，模锻件	按协议	T6	纵向	390	255	10	100

① 硬度 直径 d22 mm 的棒材，在 T6 状态下为 135HBS。
② 室温拉伸性能见表 2.5-12。
③ 各种温度下的力学性能见表 2.5-13。
④ 冲击性能见表 2.5-14。

表 2.5-12 室温下力学性能

品种	状态	规格/mm	试样方向	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_{10}/%
挤压带材	T6	截面 60×110	纵向	510	338	17.5
			长横向	436	294	17.0
			短横向	436	294	11.5
模锻件	T6	压气机叶片	纵向	412~441	—	10.0

表 2.5-13 各种温度下的力学性能

品种	状态	规格/mm	温度/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.01}$/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_{10}/%	ψ/%
挤压带材	T6	截面 30×130	20	491	274	325	13.0	21.2
			100	471	247	288	15.6	22.8
			150	428	268	296	16.1	28.7
			200	374	228	274	16.1	33.4
			250	236	128	168	16.9	66.6
			300	171	94	112	21.5	75.9
			350	108	25	59	27.6	85.6

表 2.5-14 冲击性能

品种	状态	规格/mm	温度/℃	a_{KU}/kJ·m^{-2}
挤压带材	T6	截面 30×130	20	186
			−40	192
			−70	210

⑤ 持久和蠕变性能 高温持久性能见表 2.5-15。高温蠕变性能见表 2.5-16。
⑥ 疲劳性能 室温疲劳性能见表 2.5-17。
⑦ 弹性性能 弹性模量 E 见表 2.5-18。切变模量 G = 26.5 GPa，泊松比 ν = 0.31。

表 2.5-15 高温持久性能

品种	状态	规格/mm	温度/℃	σ_{25}/MPa	σ_{50}/MPa	σ_{100}/MPa	σ_{150}/MPa	σ_{200}/MPa	σ_{250}/MPa	σ_{300}/MPa
挤压带材	T6	截面 30×130	200	—	216	186	177	167	167	157
			230	157	137	127	123	118	118	110
			250	137	113	98	93	88	88	88
			270	108	98	78	69	64	59	54
			300	69	64	54	49	44	41	41
			320	49	44	34	31	29	25	20

表 2.5-16 高温蠕变性能

品种	状态	规格/mm	温度/℃	$\sigma_{0.2/50}$/MPa	$\sigma_{0.2/100}$/MPa	$\sigma_{0.2/300}$/MPa
挤压带材	T6	截面 60×110	200	—	157	118
			230	108	88	78
			250	88	74	49
			270	59	49	34
			300	34	31	20
			320	25	20	15

2.2.4 抗蚀性

一般抗蚀性尚可，有应力腐蚀开裂倾向，需阳极化处理后使用。比 2A07 合金的抗蚀性稍高。

2.2.5 工艺参数

熔炼温度 720~750℃，铸造温度 715~730℃，均匀化退火温度 480℃。模锻温度 400~470℃，一次加热所允许的变形量为 80%。自由锻温度 380~450℃，一次加热所允许的变形量为 60%。固溶处理温度 500℃±5℃或 500^{+3}_{-5}℃，过烧温度 512℃。时效规范：165~175℃，16 h。

表 2.5-17 室温疲劳性能

品种	状态	规格/mm	取样方向	N/周	$\sigma_{-1}^{①}$/MPa	$\sigma_{-1}^{②}$/MPa
挤压带材	T6	截面 60×110	纵向	2×10^7	162	93
			长横向	2×10^7	152	54

① 光滑圆试样，d = 7.52 mm。
② 环形半圆缺口试样，缺口半径 r = 0.75 mm。

表 2.5-18 弹性模量[①]

温度/℃	20	100	150	200	250	300	350
E/GPa	70.6	66.7	—	60.8	57.9	50.0	44.1

① 测试样品材料是挤压带材。

2.2.6 品种和用途

主要半成品为棒材，也可加工成锻件。用于工作温度为200～300℃的涡轮喷气发动机轴向压气机叶片、叶轮和盘等。但在新型发动机中已为其他合金所取代。

2.3 2A10 合金

2.3.1 成分和组织

2A10合金为Al-Cu-Mg系铆钉硬铝。该合金有值得注意的特点：塑性、抗剪强度、铆接性能都比较好，可在淬火后任何时间内铆接，不受热处理后时间的限制。与其他硬铝相比，合金成分也有明显的特点，镁和锰的含量是最低的。铁、硅和其他杂质的总和也是最低的，而且控制硅含量大于铁含量。由于镁、锰含量和杂质含量低，保证了2A10合金有好的塑性，硅大于铁，可形成 Mg_2Si 增加时效强化作用，硅还能与铁形成AlMnFeSi化合物，阻止 $CuFeAl_7$ 化合物的形成，保证铜能充分进入强化相S，从而保证了合金的强化效果。由于具有上述特点，2A10合金成为广泛应用的铆钉材料。

2A10合金有晶粒粗大化倾向，耐蚀性较差，且有晶间腐蚀倾向，须经保护处理后使用。使用温度不能超过100℃。

其主成分（质量分数）为：Cu = 3.9%～4.5%，Mg = 0.15%～0.3%，Mn = 0.3%～0.5%。详细成分见本篇第1章表2.1-15。

主要相组成物为α(Al)、θ($CuAl_2$)、S(Al_2CuMg)，可能的杂质相：Mg_2Si、$AlCu_2Fe$、$(FeMn)Al_6$、AlMnFeSi等。

铜和镁形成θ和S强化相，锰和硅起补充强化作用，消除铁的有害影响；钛细化晶粒，其他元素均按杂质控制。

2.3.2 物理性能

1）热学性能 热导率见表2.5-19，比热容见表2.5-20。

表 2.5-19 热导率

温度/℃	25	100	200	300	400
λ/W·(m·K)$^{-1}$	147	155	163	172	184

表 2.5-20 比热容

温度/℃	100	200	300	400
c/J·(kg·K)$^{-1}$	963	1 047	1 130	1 172

2）电性能 电阻率 ρ 为 50.4 nΩ·m。

3）磁性能 无磁性。

2.3.3 力学性能

1）技术标准规定的性能见表2.5-21。

表 2.5-21 力学性能

技术标准	品种	试样状态	d/mm	τ/MPa≥
GB/T 3196—2002	线材	T4，T6	≤8.0	245
GJB 2055—1994			>8.0	235

2）室温及各种温度下的力学性能 室温拉伸性能见表2.5-22。各种温度下的拉伸性能见表2.5-23。不同温度剪切性能见表2.5-24。

表 2.5-22 室温拉伸性能

品种	试样状态	σ_b/MPa	δ_{10}/%
线材	T6	390	20

表 2.5-23 各种温度下的拉伸性能

品种	试样状态	d/mm	温度/℃	σ_b/MPa	δ_{10}/%	ψ/%
线材	T6	8	100	353	22	55
			150	299	22.5	59
			175	—	—	—
			200	265	23	66
			250	235	23	69
			300	147	23	78

表 2.5-24 不同温度剪切性能

品种	试样状态	d/mm	稳定化处理 温度/℃	稳定化处理 时间/h	温度/℃	时间/min	τ/MPa	样本大小 n
线材	T6	4	—	—	20	30	247	5
			—	—	100		225	
			—	—	125		200	
			—	—	150		193	
			—	—	175		183	
			—	—	185		180	
			—	—	190		178	
			—	—	200		177	
			—	—	210		163	
			—	—	220		150	
			—	—	250		125	
			125	100	125		228	
			150	100	150		219	

3）弹性模量 弹性模量 E = 69 GPa，切变模量 G = 27 GPa，泊松比 ν = 0.31。

2.3.4 铆接性能

2A10合金铆钉铆接后的抗剪强度比铆接前明显增加。淬火时效状态未铆接时 τ 为250～265 MPa，铆接后：ϕ3 mm的为314 MPa，ϕ5 mm的为319 MPa，ϕ7 mm的为301 MPa，增加50～70 MPa。可以认为，淬火和时效状态下的变形，不仅有力地强化了铆钉的杆部，而且在更大程度上强化了铆钉的头部。2A10合金优于2B12合金，2A10合金铆钉沿杆部断裂，2B12合金则在头部下面断裂。

2A10合金铆钉双剪接头的静力持久强度：20℃时为320 MPa，175℃时为254 MPa。20℃时与2A04合金的相当，175℃时比2A04合金的低。

2A10合金铆钉可在淬火时效后任意时间使用。

2.3.5 抗蚀性

2A10合金由于铜含量较高，且处于（α+θ+S）相区，一般来说，抗蚀性不好，相对来说自然时效状态比人工时效状态抗蚀性好，但淬火时冷却慢，或自然时效状态的材料在使用过程中受热，都会降低其抗蚀性。加热温度超过100℃后，有晶间腐蚀倾向。2A10合金铆钉应在保护条件下使用。

2.3.6 工艺参数

熔炼温度720～750℃，铸造温度715～730℃。挤压温度

320～450℃。退火温度 380℃。淬火温度 525℃±5℃；时效规范：自然时效，温室，96 h 以上；人工时效 75℃±5℃，24 h。

2.3.7 品种和用途

半成品以各种规格的线材供应，用作工作温度在 100℃以下结构的铆钉。

2.4 2A11 合金

2.4.1 成分和组织

2A11 合金属 Al-Cu-Mg 系，为中等强度的硬铝。与 2A12 合金相比，含镁量较低，强度也略低，但塑性较高，其他性能相近。2A11 合金抗蚀性差，特别是不耐海水腐蚀。加热超过 100℃时有晶间腐蚀倾向。阳极化处理、涂漆、包铝均可提高其抗蚀性。热处理强化效果大，但热处理工艺要求严格。可压力加工成各种形式的半成品。

其主要成分（质量分数）为：Cu=3.8%～4.8%，Mg=0.4%～0.8%，Mn=0.4%～0.8%。详细成分见本篇第 1 章表 2.1-15。

主要相组成物：α(Al)、θ($CuAl_2$)、S(Al_2CuMg)。主要合金元素为铜、镁、锰。铜和镁形成强化相 θ 和 S。锰起补充强化作用。钛能细化铸造组织晶粒，减小焊接裂纹敏感性。铁、硅、镍、锌均为杂质。可能的杂质相：Mg_2Si、AlMnFeSi、AlSiMnCuFe 等。

2.4.2 物理性能

1）热性能 热导率见表 2.5-25，比热容见表 2.5-26，线胀系数见表 2.5-27。

表 2.5-25 热导率 λ W·(m·K)$^{-1}$

温度/℃		25	100	200	300	400
状态	T4	117	130	151	172	176
	O	172	—	—	—	—

表 2.5-26 比热容

温度/℃	100	200	300	400
c/J·(kg·K)$^{-1}$	921	963	1 005	1 047

表 2.5-27 线胀系数

温度/℃	-50～20	20～100	20～200	20～300
α/10^{-6}K^{-1}	21.8	22.9	24	25

2）密度 ρ 为 2.8 g·cm^{-3}。

3）电性能 合金 T4 状态下的电阻率 ρ=54 nΩ·m。

4）磁性能 无磁性。

2.4.3 力学性能

1）技术标准规定的性能，见表 2.5-28～表 2.5-31。

表 2.5-28 板材力学性能

技术标准	品种	试样状态	δ 或 d/mm	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ/%
GB/T 3880—1997	轧制板材（正常包铝或工艺包铝）	O	0.5～2.9 >2.9～10.0	≤225 ≤235	—	≥12①
		T42	0.5～2.9 >2.9～10.0	≥350 ≥355	≥185 ≥195	≥15①
		T3	0.5～1.6 >1.6～2.9 >2.9～10.0	≥375	≥215	≥15① ≥17① ≥15①
		T4	0.5～2.9 >2.9～10.0	≥360 ≥370	≥185 ≥195	—
		T42	>4.5～10.0 >10.0～12.5 >12.5～25.0 >25.0～40.0 >40.0～70.0 >70.0～80.0	≥355 ≥370 ≥370 ≥330 ≥310 ≥285	≥195 ≥215 ≥215 ≥195 ≥195 ≥195	≥15 ≥11 ≥11① ≥8① ≥6① ≥4①
		F	>4.5～150.0	—	—	—
GJB 2662—1996	厚板	O	7～10	≤235	—	≥12
		T4	7～10 >10～25 >25～40 >40～70 >70～80	≥355 ≥375 ≥335 ≥315 ≥285	≥186 ≥215 ≥196 ≥196 ≥196	≥12 ≥11 ≥8 ≥6 ≥4

① 为 δ_5 数据。

表 2.5-29 管棒材力学性能

技术标准	品种	试样状态	δ 或 d/mm	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ/%
GB/T 4437—2000	管材	O	所有	≤245	—	≥10.0
		T4	≤120 >120	≥355 ≥375	≥195 ≥215	≥12.0 ≥10.0

续表 2.5-29

技术标准	品种	试样状态	δ 或 d/mm	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ/%
GJB 2381—1995	挤压管材（壁厚 5～35 mm）	O	25～250	≤245	—	≥10.0
		T4	25～120 120～250	≥350 ≥370	≥196 ≥215	≥12.0 ≥10.0
GB/T 3191—1998	挤压棒材②	T4	≤160 >160	≥375 ≥355	≥215 ≥195	≥12① ≥10
GJB 2054—1994	挤压棒材	T4	5～150 >150～250	≥375 ≥340	≥215 ≥200	≥12 ≥8
GJB 2507—1995	挤压型材	O	所有	≤245	—	≥12.0
		T4	≤10.0 >10.0～20.0 >20.0	≥355 ≥375 ≥400	≥215 ≥225 ≥245	≥12.0 ≥12.0 ≥10.0

①为 δ_5 数据。②直径 d>150 mm 的棒材，其力学性能附报告单。

表 2.5-30 冷拉管力学性能

技术标准	品种	试样状态	管材尺寸/mm		σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_{10}/%
			外径 d	壁厚 δ			
GJB 2379—1995	冷拉管	F	所有尺寸		≤245	—	≥10.0
		T4	<22	≤1	≥375	≥195	≥13.0
				1.5～2.0			≥14.0
			22～50	≤1	≥390	≥225	≥12.0
				1.5～5.0			≥13.0
			>50	≤5.0	≥390	≥225	≥11.0
			型管		≥390	≥225	≥12.0

注：1. 壁厚 δ<5 mm 的管材的室温纵向力学性能，由供需双方另行协商或附试验结果。
2. 外径 d185～300 mm，壁厚 δ<3.25 mm 的管材，室温纵向力学性能由供需双方另行协商。

表 2.5-31 锻件力学性能

技术标准	品种	状态	纵向			长横向			短横向		HBS
			σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	δ_5/%	
			≥								
GJB 2351—1995	自由锻件	T4	355 355	— —	10.0 10.0	335 335	— —	5.0 5.0	315 315	4.0 4.0	95 95
GJB 2351—1995	模锻件	T4	375 375	195 196	12.0 12.0	355 355	175 177	6.0 6.0	325 325	5.0 5.0	95 95

2）压缩性能　模锻件于 T4 状态下的 σ_{-b} = 981 MPa。

3）冲击性能　自由锻件和模锻件于 T4 状态下的冲击韧度 a_{KU} = 290 kJ/m²；螺旋桨桨叶模锻件的冲击韧度 a_{KU} = 280～340 kJ/m²。

4）扭转与剪切性能　锻件的扭转与剪切性能见表 2.5-32。

5）疲劳性能　高周疲劳性能见表 2.5-33。

表 2.5-32 锻件扭转与剪切力学性能

品种	状态	τ_b/MPa	$\tau_{0.3}$/MPa	τ/MPa
锻件	T4	373	177	265

6）弹性模量　模锻件弹性模量 E = 69 GPa，模锻件切变模量 G = 26 GPa，模锻件泊松比 ν = 0.31。

表 2.5-33 疲劳性能

品种	状态	温度/℃	转数/周	σ_{-1}/MPa	σ_{-1H}①/MPa	δ_{10}/%
—	T4	20	2×10^7	123	88	9
桨叶模锻件	T4	20	2×10^7	167	—	10

① 为缺口半圆形凹槽形状。

2.4.4 抗蚀性

2A11 合金在大气中的抗蚀性中等，在潮湿空气中和电解质溶液中有晶间腐蚀和应力腐蚀开裂倾向。该合金抗蚀性的好坏受热处理工艺的影响很大，因为 2A11 合金含铜量较高，强化相为含铜相 θ 和 S，当过饱和固溶体分解析出 θ 和 S 相时，靠近晶界处的过饱和固溶体首先分解，使 θ 和 S 相沿晶界析出，并造成晶界附近出现贫铜带，贫铜带相对于晶粒

内部为阳极，容易产生电化学腐蚀。因此，凡造成过饱和固溶体不均匀分解的热处理工艺都影响2A11合金的抗蚀性。过烧、淬火冷却速度慢、淬火转移时间长均使2A11合金的抗蚀性下降。自然时效状态抗蚀性较好，人工时效状态的较差。人工时效前进行预变形，能改善其抗蚀性。使用温度超过100℃时，会出现晶间腐蚀。

包铝后有可靠的保护作用，因为纯铝相对于2A11合金为阳极，包铝层铝的纯度应高于99.5%。加工和使用时应防止铜向包铝层中扩散，否则会降低保护效果。

2.4.5　工艺性能与参数

熔炼温度为720～760℃，铸造温度为700～725℃（方锭取下限，圆锭取上限），均匀化退火温度为495℃，热轧温度290～440℃（最佳420℃），挤压温度400～460℃（不得超过490℃），锻造温度350～470℃，典型退火温度415℃，淬火温度500^{+5}_{-1}℃，一般采用自然时效。

热状态下塑性好，退火或新淬火后成型性能也较好，时效后塑性低。

淬火时应严格控制加热温度，同时淬火转移时间不得超过40 s，淬火冷却速度应大于50℃/s。自然时效96 h以上可获得合格的性能。淬火自然时效后的2A11合金，在200～250℃加热，保温2～3 min，即可回归到淬火状态，仍能进行自然时效。

2.4.6　品种和用途

可加工成板、管、棒、型材和锻件。用作中等强度的结构件，如飞机骨架，螺旋浆叶片，建筑、造船、交通工业的结构件和配件等。

2.5　2A12合金

2.5.1　成分和组织

2A12合金为硬铝中的典型合金，其成分比较合理，综合性能较好。很多国家都生产2A12合金，成分几乎相同，是硬铝中用量最大的。该合金的特点是：强度高，有一定的耐热性，可用作150℃以下工作的零件。温度高于125℃时，2A12合金的强度比7A04合金的还高。热状态、退火和新淬火状态下成形性能比较好，热处理强化效果显著，但热处理工艺要求严格。抗蚀性较差，用纯铝包覆可以得到有效的保护；焊接时易产生裂纹，采用特殊工艺可以焊接，也可以铆接。

其主要成分（质量分数）为：Cu＝3.8%～4.9%，Mg＝1.2%～1.8%，Mn＝0.3%～0.9%，详细成分见本篇第1章表2.1-15。

主要相组成物：α(Al)、S(Al_2CuMg)、θ($CuAl_2$)、$MnAl_6$。可能的杂质相：Mg_2Si、AlMnFeSi或AlSiMnCuFe等。

2.5.2　物理性能

1）热性能　热导率见表2.5-34，比热容见表2.5-35，线胀系数见表2.5-36。

表2.5-34　热导率λ　W·(m·K)$^{-1}$

温度/℃		25
状态	T4	121
	O	193

表2.5-35　比热容

温度/℃	100	200	300	350
c/J·(kg·K)$^{-1}$	921	1 047	1 130	1 172

表2.5-36　线胀系数

温度/℃	-50～20	20～100	20～200	20～300
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	21.4	22.7	23.8	24.7

2）密度（20℃）：2.8 g·cm^{-3}。

3）电性能　电阻率：T4状态下为73 nΩ·m，O状态下为44 nΩ·m；导电率：T4状态下为30%，O状态下为50%（与国际标准铜导电率之比）。

4）磁性能　无磁性。

2.5.3　力学性能

1）技术标准规定的性能　板材、棒材、型材、管材和锻件标准规定的性能见表2.5-37～表2.5-41。

表2.5-37　板材力学性能

技术标准	品种	供应状态	试样状态	δ/mm	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_{10}/%
GB/T 3880—1997	板材（正常包铝或工艺包铝）	O	O	0.5～4.5 >4.5～10.0	≤215 ≤235	—	≥14 ≥12
			T42	0.5～2.9 >2.9～10.0	≥390 ≥410	≥45 ≥265	≥15 ≥12
		T3	T3	0.5～1.6 >1.6～10.0	≥405 ≥420	≥270 ≥275	≥15 ≥15
		T4	T4	>0.5～2.3 >2.3～4.5 >4.5～10.0	≥405 ≥425 ≥425	≥270 ≥275 ≥275	≥13 ≥12 ≥12
		H112	T42	>4.5～10.0 >10.0～12.5 >12.5～25.0 >25.0～40.0 >40.0～70.0 >70.0～80.0	≥410 ≥420 ≥420 ≥390 ≥370 ≥345	≥265 ≥275 ≥275 ≥255 ≥245 ≥245	≥12 ≥7 ≥7① ≥5① ≥4① ≥3①
GJB 2053—1994	不包铝 加厚包铝	O	T42 T42	0.5～6.5 0.5～6.5	≥425 ≥350	≥275 ≥220	≥10 ≥13

续表 2.5-37

技术标准	品种	供应状态	试样状态	δ/mm	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_{10}/%
GJB 2662—1996	厚板[2]	O	O	7~10	≤235	—	≥12
		T4	T4	7~10	≥425	≥280	≥10
		F112	T4	7~10 >10~25 >25~40 >40~70 >70~80	≥410 ≥420 ≥390 ≥370 ≥345	≥255 ≥275 ≥255 ≥245 ≥245	≥10 ≥7 ≥5 ≥4 ≥3
GJB 3424—1998	变截面板材	O，T4	O	1.0~2.5[3] >2.5~5.0[3]	≤225 ≤235	— —	≥10 ≥10
			T42	1.0~2.5[3] >2.5~5.0[3]	≥390 ≥410	≥225 ≥265	≥15 ≥12
			T4	1.0~2.5[3] >2.5~5.0[3]	≥405 ≥425	≥270 ≥280	≥13 ≥11
GJB 1741—1993	预拉伸板材（不包铝）	—	T351	6.5~12.0	≥440	≥290	≥12
				>12.0~25.0	≥435		≥7[1]
				>25.0~40.0	≥425		≥6[1]
				>40.0~45.0			≥5[1]

① 试样标距为5*d*。② 当厚度大于40~80 mm时，承制方不作力学性能检验，但应保证符合表中数据要求。厚度超出本表要求时，力学性能附实测结果。③ 为薄端厚度。

表 2.5-38 棒材力学性能

技术标准	品种	供应状态	试样状态	*d*/mm	σ_b/MPa	$\sigma_{b0.2}$/MPa	δ_5/%
					≥		
GB/T 3191—1998	普通棒材[1]	H112，T4	T4，T42	≤22 >22~150	390 420	255 275	12 10
	高强度棒材	H112，T4	T4，T42	20~120	440	305	8

① 直径 *d*>150 mm棒材，其力学性能附实测结果。

表 2.5-39 型材力学性能

技术标准	品种	供应状态	试样状态	型材厚度/mm	σ_b/MPa	$\sigma_{b0.2}$/MPa	δ_5/%
					≥		
GJB 2507—1995	挤压型材	O	O	所有	≤245	—	12.0
		T6	T6	≤5.0 >5.0~10.0 >10.0~20.0 >20.0~40.0 >40.0	390 410 420 440 480	295 295 305 315 355	10
GJB 2056—1994	变截面型材	—	T4	—	410	285	8
GJB 2663—1996	大规格型材	—	T4	纵向[1] 长横向 短横向[2]	440 395 345	310 285 275	10 6 4

① 对于XC64691~XC64693、XC64696~XC64697和XC64699~XC646911对接型材，其σ_b应不低于480 MPa，$\sigma_{p0.2}$应不低于355 MPa，若低于规定值10~20 MPa时可协商交货。
② 只对机翼大梁要求短横向性能，而对对接型材不要求。

表 2.5-40 管材力学性能

技术标准	品种	供应状态	试样状态	管材尺寸/mm 外径 *d*	管材尺寸/mm 壁厚 δ	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ/%
						≥		
GB/T 4437.1—2000	挤压管材[1]	O	O	所有尺寸		≤245	—	10.0
		H112，T4	T4	—	所有	390	255	12.0

续表 2.5-40

技术标准	品种	供应状态	试样状态	管材尺寸/mm 外径 d	壁厚 δ	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ/%
						≥		
GJB 2379—1995	拉制（轧制）管材	—	O	所有尺寸		≤245	—	10.0②
		—	T4	<22	≤1	410	255	13.0②
					1.5~2.0			14.0②
				22~50	≤5.0	420	285	12.0②
				>50				10.0②
				型管			265	

① 外径 d185~300 mm，壁厚 δ>32.5 mm 的管材，室温纵向力学性能由供需双方另行协商或附试验结果。
② 为 δ_{10} 数据。

表 2.5-41 锻件力学性能

技术标准	品种	试样状态	取样方向	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%
				≥		
GJB 2351—1995	模锻件	T4	L	420	275	10.0
	自由锻件					

注：HBS≥100。

2）硬度 各种制品的硬度见表 2.5-42。

表 2.5-42 硬度

品种	δ 或 d/mm	状态	HBS
大型型材	—	T4	131
棒材	40	T4	131
预拉伸板材	18	T351	126
预拉伸板材	25	T351	114
轧制品	—	T4	120
挤压品	—	T4	130

3）压缩性能 室温压缩性能见表 2.5-43。

表 2.5-43 压缩性能

品种	状态	$\sigma_{pc0.2}$/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa
挤压品	T4	382	373
轧制品	T4	314	284
轧制品	T6	412	392

4）冲击性能 合金制品的冲击性能见表 2.5-44。

5）扭转与剪切性能 合金制品在 20℃时的典型值见表 2.5-45。

6）持久和蠕变性能 高温持久强度极限见表 2.5-46。高温蠕变极限见表 2.5-47。

7）疲劳性能

① 高周疲劳 室温疲劳极限见表 2.5-48。高温疲劳极限见表 2.5-49。

表 2.5-44 冲击性能

品种	状态	试样取向	组织特征	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ/%	a_{KU}/kJ·m^{-2}
挤压带板 12 mm×75 mm	T4	—	未再结晶	534	359	13.8	196
			再结晶	487	341	17.5	176
薄板厚度 δ 2.0 mm	T4	—	—	476	325	22.0	157
	T6	—	—	472	411	11.9	98
厚板	T4	纵向	—	456	333	16.0	196
		长横向	—	446	304	11.0	147

表 2.5-45 扭转时剪切性能

品种	d/mm	状态	τ_p/MPa	$\tau_{0.3}$/MPa	τ_b/MPa	τ/MPa
大型型材	—	T4	127	196	382	294
棒材	40	T4	137	177	343	255

表 2.5-46 高温持久强度极限

品种	状态	温度/℃	σ_{10}/MPa	σ_{100}/MPa	σ_{1000}/MPa
板材	T4，T6	100	392	382	373
		125	—	333	294
		150	343	294	235
		175	275	226	172
		200	235	177	118

表 2.5-47 高温蠕变极限

品种	状态	温度/℃	$\sigma_{0.2/100}$/MPa	$\sigma_{0.2/1000}$/MPa
大型型材	T4	150	255	216
		175	167	98
小型材	T4	150	206	—
		175	147	88
		200	93	59
薄板材	T4	150	177	113~118
		175	113	—
		200	78	44~49

② 低周疲劳 δ2.0 mm 板材室温轴向拉伸低周疲劳性能见表 2.5-50。

表 2.5-48 室温疲劳极限

品种	d/mm	状态	N/周	σ_D/MPa
大型型材	—	T4 O	5×10^8	137 88
棒材	40	T4	5×10^8	137

表 2.5-49 高温疲劳极限

状态	T4		N/周 (5×10^8)		
温度/℃	25	150	200	260	315
σ_{-1}/MPa	137	117	86	58	52

表 2.5-50 板材低周疲劳性能

状态	R	f /周·min^{-1}	K	σ_{max} /MPa	N/周	
					max ~ min	平均
T42	0.1	10	0.7	269	15 268 ~ 11 867	13 778
T62	0.1	10	0.7	282	7 637 ~ 6 285	6 643

$\delta<5$ mm 挤压型材室温轴向拉伸低周疲劳性能见表 2.5-51。

表 2.5-51 型材低周疲劳性能

状态	σ_{bH} /MPa	R	f /周·min^{-1}	K	σ_{max} /MPa	N/周	
						max ~ min	平均
T42	385	0.1	10	0.7	270	16 579 ~ 12 408	13 960
T62	431	0.1	10	0.7	301	5 265 ~ 3 818	4 763
T6	474	0.1	10	0.7	331	9 082 ~ 8 232	8 492

8）弹性性能　不同制品拉伸弹性模量见表 2.5-52。室温切变模量 $G=26$ GPa，泊松比 $\nu=0.33$。

9）断裂性能　平面应变断裂韧度见表 2.5-53。

2.5.4 焊接性能

2A12 合金可焊性不好。Al-Cu 合金裂纹敏感高峰区为含铜 1% ~ 3%，2A12 含铜量虽然超过 3%，但还含有形成低熔点多元共晶的其他元素，结晶温度区间宽，因而焊接裂纹敏感性大，焊缝强度和抗蚀性亦下降。除焊接后可重新热处理外，一般不宜采用焊接。软状态材料不能焊接。不能采用气

表 2.5-52 弹性模量

品种	板材					挤压型材		挤压棒材	
状态	T42	T62	T4	T6	T0	T351 不包铝	T651 不包铝	T62	T4
δ 或 d/mm	2	2	2	2	2.5	15	15	壁厚 < 5	30
试验温度/℃	E/GPa								
-196	—	—	73	—	—	—	—	—	—
-70	—	—	70	—	—	—	—	—	—
20	66	67	68	68	68	68	68	71	71
100	64	—	64	—	64	—	—	—	65
125	64	—	61	—	61	—	—	—	—
150	62	62	58	—	58	64	63	63	63
175	60	61	56	56	56	59	63	63	—
200	—	59	54	54	54	—	—	61	60
225	—	55	—	52	—	—	—	60	—
250	—	53	48	49	48	—	—	58	58
300	—	—	42	—	43	—	—	—	51

表 2.5-53 断裂韧度

合金	制品	状态	δ/mm	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$		
				$L-T$	$T-L$	$S-L$③
2A12	挤压带板	T4	65 × 200	37	31	29
		T6	65 × 200	31	—	21
		T4	12 × 75	38① 42②	— —	— —
	厚板	T4 T6	— —	— 24 ~ 25	33 ~ 37 21 ~ 22	— —
		—	40	34	—	28
		T651 不包铝	16	21	—	—
		T351 不包铝	18	34	30	—
		T351 不包铝	25	37	32	—

① 为未再结晶组织；② 为再结晶组织；③ L 为纵向，T 为横向，S 为高向。

焊和钎焊，点焊和氩弧焊时，需采用特殊工艺和设备才能得到满意的效果。采用4A01合金作填充金属可减少焊接裂纹，但焊缝强度不高，抗蚀性下降。可重新进行热处理以恢复焊缝强度和提高抗蚀性。

2.5.5　抗蚀性

2A12合金在淬火自然时效状态下有满意的抗蚀性，此时合金元素固溶于铝中或仅出现GP区，尚无第二相析出，腐蚀情况表现为全面腐蚀。如果自然时效后的材料在使用过程中受热，或人工时效后在晶间出现θ相和S相，或淬火转移时间长或冷却速度小，导致θ相和S相析出，造成晶界附近出现贫铜带，会引起晶间腐蚀。

人工时效前进行预变形，可改善2A12合金的抗蚀性。工业上最常用的是包铝来保护，因为纯铝对于2A12合金基体为阳极，所以保护作用可靠。包铝层铝的纯度应在99.5%以上。

2.5.6　工艺性能及参数

熔炼温度720~760℃，铸造温度700~730℃（方锭取下限，圆锭取上限）。均匀化退火温度490℃，热轧温度390~440℃（最佳420℃），锻造温度380~470℃。淬火温度485~498℃，过烧温度502℃。时效规范：自然时效，室温，≥96 h；人工时效，185~195℃，6~12 h。

为保证合金的抗蚀性和力学性能，热处理时必须严格控制固溶处理温度，不允许过烧，淬火转移时间不得超过30 s，淬火冷却速度不得低于50℃/s。

2.5.7　品种和用途

可以加工成板、带、管、棒、线、型材和锻件。

主要用作飞机蒙皮、骨架、肋梁、隔框等高强度结构件和150℃以下工作的零件。

2.6　2A14合金

2.6.1　成分和组织

2A14属Al-Mg-Si-Cu系锻铝，是锻铝中的典型合金。除锰、硅含量稍高以外，其余成分与2A11合金的相同，也称高强度硬铝。

该合金的特点是：强度高，与2A12合金强度相当；但铸锭的热裂倾向比2A12合金的小，有好的热塑性，锻造性能也比2A12合金的好；有较好的耐热性和可焊性。其缺点是材料的纵向和横向性能差别较大，人工时效状态有晶间腐蚀和应力腐蚀开裂倾向。

其主要成分（质量分数）为：Cu = 3.9% ~ 4.8%，Mg = 0.4% ~ 0.8%，Si = 0.60% ~ 1.2%，Mn = 0.4% ~ 1.0%，详细成分见本篇第1章表2.1-15。

主要相组成物：α(Al)、Mg_2Si、θ($CuAl_2$)、S(Al_2CuMg)、W($Cu_4Mg_5Si_4Al_4$)；杂质相为(FeMnSi)Al_6等。

2.6.2　物理性能

1）热性能　热导率见表2.5-54。比热容见表2.5-55。线胀系数见表2.5-56。

表2.5-54　热导率

温度/℃	20	100	200	300	400
λ/W·(m·K)$^{-1}$	159	168	176	180	180

表2.5-55　比热容

温度/℃	100	200	300	400
c/J·(kg·K)$^{-1}$	838	880	964	1 090

表2.5-56　线胀系数

温度/℃	-50~20	20~100	20~200	20~300	100~200	200~300
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	21.6	22.5	23.6	24.5	24.7	26.3

2）密度（20℃）为2.8 g·cm^{-3}。

3）电性能　合金在T6状态下的电阻率ρ为43 nΩ·m。

4）磁性能　无磁性。

2.6.3　力学性能

1）技术标准规定的性能见表2.5-57和表2.5-58。

2）各种温度下的力学性能见表2.5-59和表2.5-60。

3）冲击性能见表2.5-61。

表2.5-57　板、棒、型材力学性能

技术标准	品种	供应状态	试样状态	δ或d/mm	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%
GB/T 3880—1997	工艺包铝板材	O	O	0.5~10.0	≤245	—	≥10①
		T6	T6	0.5~10.0	≥430	≥340	≥5①
		H112	T62	>4.5~12.5	≥430	≥340	≥5①
				>12.5~40.0	≥430	≥340	≥5
		F	—	—	—	—	—
GJB 1741—1993	不包铝预拉伸板材	T651	T651	6.5~12.0	≥460④	≥405④	7②
				>12.0~25.0			5③
GB/T 3191—1998	普通棒材	H112、T6	T62、T6	≤22	≥440	—	≥10
				>22~150	≥450		≥10
	高强棒材	H112、T6	T62、T6	20~120	≥460	—	≥8
GJB 2507—1995	挤压型材	T4	T4	所有厚度	≥375	≥205	≥10
		H112、T6	T6	≤10	≥410	≥365	≥7.0
				>10	≥450	≥375	
		O	O	所有厚度	195~275	—	—

① 为δ_{10}数据；② 标距为50 mm；③ 标距为5D；④ 如对伸长率（δ_{10}）要求大于等于6%时，其抗拉强度（σ_b）和规定非比例伸长应力（$\sigma_{p0.2}$）分别不低于440 MPa和335 MPa。直径大于150 mm棒材性能附实测结果。

表 2.5-58 锻件力学性能

技术标准	品种	状态	质量 /kg	纵向			长横向			短横向		HBS
				σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	σ_b /MPa	δ_5 /%	
				≥								
GJB 2351—1995	自由锻件	T4	≤750	380	245	10.0	365	—	8.0	325	4.0	—
			>750	375	235	8.0	355	—	7.0	325	4.0	—
	模锻件		—	380	245	11.0	365	235	8.0	345	6.0	—
	自由锻件	T6	≤30	410	—	8.0	355	—	4.0	335	3.0	120
			>30	380	—	6.0	355	—	4.0	335	2.0	110
	模锻件		≤30	430	315	10.0	390	—	6.0	355	4.0	120
			>30	410	295	8.0	390	—	6.0	355	3.0	110

注：按 GJB 2351—1995 规定，热处理厚度大于 150 mm 的锻件，其性能由供需双方议定。

表 2.5-59 板、棒、型材在各种温度下的力学性能

品种	状态	方向	规格/mm	温度/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	δ_{10}/%	ψ/%
挤压棒材	T6	纵向	直径 ϕ50	20	530	451	12	—	—
				-70	539	481	12	—	—
				-196	647	569	14	—	—
				-253	765	618	14	—	—
挤压型材			壁厚 30~50	20	481	441	—	7	15
				-70	500	451	—	8	16
				-196	598	520	—	10	14
板材		长横向	厚度 3	20	461	402	10	—	—
				-70	481	422	10	—	—
				-196	549	451	14	—	—
				-253	628	510	17	—	—

表 2.5-60 锻件在各种温度下的力学性能

品种	状态	方向	规格 /mm	温度 /℃	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%
锻件	T6	纵向	大型	20	471	373	11
				150	373	284	16
				175	343	—	18
				200	294	226	18
				250	196	—	—

表 2.5-61 各种材料的冲击性能

品种	状态	规格/mm	组织	a_{KU}/kJ·m^{-2}
厚板	T6	δ20	再结晶	186
挤压带材	T6	截面 146×168	再结晶	166
			未再结晶	157
模锻件	T6	—	多边化晶体	176
			混合晶	166
挤压棒材	T6	直径 d180	再结晶	117
			未再结晶	117

4）扭转与剪切性能　大型模锻件、锻件的扭转强度 τ_b = 343 MPa，抗剪强度 τ = 284 MPa。

5）持久和蠕变性能见表 2.5-62。

6）疲劳性能　T6 状态的小型锻件的 σ_{-1} = 123 MPa（N = 5×10^8 周）。不同温度下的 σ_{-1} 见表 2.5-63。

表 2.5-62 持久与蠕变性能

品种	状态	温度/℃	$\sigma_{0.2/10}$/MPa	$\sigma_{0.2/100}$/MPa	$\sigma_{0.2/1000}$/MPa
挤压件和锻件	T6	100	397	392	382
		125	—	—	353
		150	284	255	226

表 2.5-63 疲劳性能

品种	状态	温度/℃	时间/h	寿命/周	σ_{-1}/MPa
锻件	T6	205	0.5	10^7	103
		260	0.5	10^7	64
		315	0.5	10^7	49
	T6	25	—	5×10^8	124
		150	—	5×10^8	93
		200	—	5×10^8	62
		260	—	5×10^8	37
		315	—	5×10^8	34
不包铝板材	T6	20	—	5×10^8	125
包铝板材		20	—	5×10^8	104

7）弹性性能　T6 状态的模锻件、锻件、板材的弹性模量 E = 71 GPa。厚板在不同试验温度下的弹性模量见表 2.5-64。

T6 状态下的小型模锻件的切变模量 G = 27 GPa，泊松比 ν = 0.33。

8）断裂性能　断裂韧度数据见表 2.5-65。

表 2.5-64　弹性模量

温度/℃	-196	-70	20	100	150	200	250
E/GPa	72.0	70.1	67.7	—	—	53.9	49.0

表 2.5-65　断裂韧度

品种	状态	规格/mm	组织	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$
厚板	T6	厚度 20	再结晶	35
挤压带材	T6	截面 146×168	再结晶 未再结晶	31 35

2.6.4　焊接性能

2A14 合金不能气焊和钎焊，可以氩弧焊和点焊。一般采用自身材料或 2A11 合金作填充金属，焊缝强度可通过重新热处理得到改善，采用焊接前同样的热处理工艺，焊缝横断面的抗拉强度可恢复到基体强度的 80%左右，塑性有所降低。2A14 合金容易产生焊接裂纹，若采用 4A01 焊条，可以减少裂纹倾向。由于该合金强度高又耐热，同时无低温脆性，随着焊接技术的发展，2A14 合金将成为重要的焊接结构材料。现已可用 2A14 合金厚板焊接大型火箭的燃料储箱。

2.6.5　抗蚀性

2A14 合金由于含铜量高，抗蚀性不好，且有晶间腐蚀和应力腐蚀开裂倾向。一般而论，2A14 合金的抗蚀性与其他高强度铝合金（例如 2A12、7A09）的耐蚀性相近。具体说 2A14 合金的抗蚀性与热处理状态和工件的断面厚度有关。淬火自然时效状态的抗蚀性好，薄断面工件比厚断面工件的抗蚀性好。断面厚的工件，淬火时得不到快速冷却，有不利的第二相析出。自然时效状态的材料，使用过程中的受热对抗蚀性有损害。

2.6.6　工艺参数

熔炼温度 700～750℃，铸造温度 700～730℃，均匀化退火温度 495℃，挤压温度 380～450℃（不得高于 490℃），锻造温度 380～480℃，退火温度 470℃。固溶处理温度 502℃±3℃，过烧温度 515℃。时效规范：自然时效 10 d 以上；人工时效，轧制或冷加工板材、线材、棒材、型材、管材等 160℃±5℃，18 h，锻件 170℃±5℃，10 h。

2.6.7　品种和用途

可加工成自由锻件，模锻件，板、带、管、棒、线、型材。

主要用作高载荷的结构件。

2.7　2A16 合金

2.7.1　成分和组织

在二元铝合金中，以 Al-Cu 系合金的耐热性能最好，进一步合金化，又以 Al-Cu-Mn 系合金耐热性能最好。2A16 合金就是在高温下使用的 Al-Cu-Mn 系硬铝合金。

2A16 合金有高的室温强度和高温（300℃以下）持久强度，热状态有较好的塑性，虽然含锰，但无挤压效应。可以焊接。由于含铜量高，抗蚀性差。可进行阳极化处理和涂漆保护，也可以包铝。

其主要成分（质量分数）为：Cu=6.0%～7.0%，Mn=0.4%～0.8%，Ti=0.1%～0.2%。详细成分见本篇第 1 章表 2.1-15。

主要相组成物：α(Al)、θ($CuAl_2$)、T($Cu_2Mn_3Al_{20}$)、$TiAl_3$。可能的杂质相：α-Fe_2SiAl_3、AlMnFeSi 等。

2.7.2　物理性能

1）热性能　热导率见表 2.5-66。线胀系数见表 2.5-67。

表 2.5-66　热导率

温度/℃	25	100	200	300	400
λ/W·(m·K)$^{-1}$	138	142	147	155	159

表 2.5-67　线胀系数

温度/℃	20～100	100～200	200～300	300～400
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	22.6	24.7	27.3	30.2

2）密度（20℃）为 2.8 g·cm^{-3}。

3）电性能　电阻率 ρ 为 61 nΩ·m。

4）磁性能　无磁性。

2.7.3　力学性能

1）技术标准规定的性能，见表 2.5-68 和表 2.5-69。

2）低温及高温拉伸性能，见表 2.5-70～表 2.5-72。

表 2.5-68　板、棒、型材力学性能

技术标准	品种	试样状态	δ 或 d/mm	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%
GJB 2053—1994	板材	O	1.0～4.0	≤235	—	15①
		T4		275	—	12
		T6		375	275	8
		T62		375	265	8
GB/T 3880—1997	厚板	T6	11～80	375	275	8①
		T4		275	—	12
GJB 2662—1996	厚板	O	4～10	≤235	—	15①
		T4		275	—	12
		T6		370	275	8
		T5	>10～40	370	275	8
		T62	5～10	370	265	8
GB/T 3191—1998	棒材④	T6	所有	355	235	8②③
GB/T 3191—1998		T62	≤150	355	235	8②
GJB 2054—1994		T6	5～150	350	235	8②
GJB 2507—1995	型材	T6	所有	345	235	8③

①　为 δ_{10} 数据；

②　为 δ_5 数据；

③　型材壁厚≤10 mm 时，平试样为 δ_{10}，圆试样为 δ_5；壁厚>10 mm 时，一律为圆试样，为 δ_5；

④　合金棒材如在合同上注明做高温持久试验时，则试样在热处理后于 300℃±3℃下以 69 MPa 的应力保持 100 h，不断裂为合格。

表 2.5-69 锻件力学性能

技术标准	品种	状态	纵向			横向			HBS
			σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	
GJB 2351—1995	模锻件	T6	375	255	8	375	255	8	100
	锻件		355	235	8	355	235	8	100

表 2.5-70 各种温度下的力学性能

品种	状态	温度/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_{10}/%	ψ/%
锻件①	T6	20	392	314	12	—
		-70	412	343	14	—
		-196	510	392	16	—
挤压成品	T6	-70	402	—	12	40
		150	338	216	11	54
		200	294	206	12	58
		250	235	157	11	67
		270	216	147	10	76
		300	177	127	14	79
		350	118	88	19	85
		400	49	39	28	93

① 锻件质量为 100 kg；试样方向为纵向；伸长率为 δ_5。

表 2.5-71 稳定化处理后力学性能

品种	状态	稳定化处理		测试温度/℃	σ_b	$\sigma_{p0.2}$	δ_{10}/%
		温度/℃	时间/h		MPa		
板材	T6	—	—	100	353	275	16
		—	—	150	314	245	16
		150	100	150	314	196	18
		—	—	200	255	177	16
		200	25	200	255	177	16
		200	100	200	235	147	14
		—	—	250	177	118	16
		250	25	250	167	108	19
		250	50	250	157	98	20
		—	—	300	118	98	20
		—	—	350	88	—	20
		—	—	—	—	—	—
锻件	T6	—	—	150	343	—	28
		150	100	150	363	—	24
		—	—	175	333	—	27
		175	100	175	324	—	24
		—	—	200	304	—	25
		200	100	200	284	—	21
		—	—	225	275	—	20
		225	100	225	245	—	27
		—	—	250	226	—	19
		250	100	250	206	—	25
		—	—	275	216	—	30
		275	100	275	181	—	28

3）持久和蠕变性能　高温持久性能见表 2.5-73。高温蠕变性能见表 2.5-74。

4）疲劳性能　高周疲劳见表 2.5-75。低周疲劳见表 2.5-76。

表 2.5-72 稳定化处理后力学性能

品种	状态	规格/mm	稳定化处理		测试温度/℃	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ /%
			温度/℃	时间/h				
型材	T62	XC 113-38	—	—	150	317	229	13.2
			150	50	150	318	233	13.6
			200	50	200	249	180	12.3
			—	—	250	200	154	17.5
			250	50	250	179	127	15.6
			300	50	300	121	92	16.2

注：合金 O 状态 XC 113-38 型材固溶处理 + 210℃，12 h 时效后再稳定化处理。

表 2.5-73 高温持久强度

品种	规格/mm	温度/℃	σ_{25} /MPa	σ_{50} /MPa	σ_{100} /MPa	σ_{200} /MPa	σ_{300} /MPa	σ_{400} /MPa
挤压带材	截面为 20×40	200	191	186	177	169	167	—
		250	132	127	123	113	108	108
		270	108	103	98	98	97	97
		300	86	83	78	76	74	73
		320	76	71	59	55	54	54
		350	44	41	39	32	29	27

表 2.5-74 高温蠕变强度极限

品种	规格/mm	温度/℃	$\sigma_{0.2/100}$ /MPa		$\sigma_{0.2/200}$ /MPa		$\sigma_{0.5/100}$ /MPa	$\sigma_{1.0/100}$ /MPa
			总变形	残余变形	总变形	残余变形	总变形	总变形
挤压带材	截面为 20×40	200	78	118	74	113	—	137
		250	69	78	59	69	—	—
		270	59	69	54	64	—	—
		300	54	64	49	59	—	—
		315	46	—	—	—	55	62
		320	39	49	34	39	—	—
		350	29	29	25	25	—	—

表 2.5-75 高周疲劳寿命①

品种	状态	温度/℃	寿命/周	σ_{-1}/MPa	$\sigma_{-1H}^{②}$/MPa
挤压半成品	T6	20	2×10^7	127	69
		200	1×10^7	103	—
		300	3×10^7	78	49

① 用旋转弯曲法加载。

② σ_{-1H} 半圆缺口试样，$K_t=2$。

表 2.5-76　低周疲劳寿命

品种	状态	δ/mm	稳定化处理		σ_{max}/MPa	寿命/周
			温度/℃	t/h		
板材	固溶热处理+165℃，12 h	1.8	—	—	250	17 885，19 377，19 383，19 630
	固溶热处理+190℃，18 h	1.8	—	—	250	9 987，11 730，14 168，16 117
			—	—	231	8 236，8 762，10 625，11 168，12 235
			150	50	251	9 029，9 510，10 669，11 805
			200	50	239	6 256，6 433，6 986，7 593
			250	50	212	6 665，7 901，7 989
	固溶热处理+210℃，12 h	1.8	—	—	250	5 283，5 474，6 402，6 627
			—	—	216	4 953，5 205，5 474
			150	50	251	6 140，7 300，7 570，8 350
			200	50	239	5 527，5 550，5 570，6 025
			250	50	212	7 515，8 783，9 554，10 567

注：1. 合金O状态板材固溶热处理加人工时效。
2. 轴向加载，$f=10\sim13$次，$K=0.7$，$R=0.1$。

5）弹性性能　弹性模量见表 2.5-77 和表 2.5-78。

表 2.5-77　板材弹性模量

品种	温度/℃	E/GPa	品种	温度/℃	E/GPa
板材	20 100 150	67.7 61.3 55.9	板材	200 250 300	52.5 49.0 42.2

表 2.5-78　挤压材弹性模量

品种	状态	温度/℃	E/GPa	品种	状态	温度/℃	E/GPa
挤压半成品	T6	20 150 200	67.7 58.3 55.9	挤压半成品	T6	250 300	52.0 49.0

6）断裂性能　断裂韧度见表 2.5-79。

表 2.5-79　断裂韧度

品种	状态	规格/mm	试样方向	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ/%	K_{IC}/MPa·$m^{1/2}$
挤压带材	T6	146×168	纵向	426	289	19.5	37.8
			横向	420	304	7.7	35.2
			高向	413	303	7.4	30.4

2.7.4　焊接性能

焊接性能较好。所有状态不能钎焊；软（O）状态不能气焊，点焊、滚焊也较难，其他状态的都可气焊、点焊、滚焊、氩弧焊。这是2A16比2A12和7A09合金优越的地方。

对于2A16合金自身相互连接，可采用基体材料作填充金属，采用含钛量稍高（0.15%）的更好，因为对焊缝的强度、塑性、抗蚀性更为有利。与其他基体材料焊接时，应采用4A01合金为填料，以减少焊接裂纹。2A16合金虽然可以焊接，但焊缝的抗蚀性低。

2.7.5　耐蚀性

2A16合金由于含铜量高，抗蚀性能不好，不能在无保护条件下使用。板材可以包铝，但由于基体含铜量高，易于扩散，因此保护作用减弱，抗蚀性低于2A12合金包铝板材。挤压制品T6状态有应力腐蚀开裂倾向。焊缝过渡区抗蚀性也很低。因此必须进行阳极化处理或涂漆保护，或先进行阳极化然后涂漆保护处理后使用。

2.7.6　工艺参数

熔炼温度700~750℃，铸造温度700~730℃（方锭取下限，圆锭取上限），均匀化退火温度525℃。热轧温度390~440℃（最佳420℃），挤压温度420~460℃（不允许超过530℃），锻造温度400~460℃。退火温度415℃，固溶处理温度535℃±5℃，过烧温度545℃，人工时效规范：165~190℃，18~36 h。时效温度与时间的组合，根据产品性能要求而定。

2.7.7　品种与用途

主要半成品为板、棒、型材和锻件。

主要用作315℃以下的高温结构件和高强度焊接件。可作发动机的导轮、压气机叶片、超音速飞机结构材料、0℃以下工作的焊接件和零件等。

2.8　2B16合金

2.8.1　成分和组织

2B16合金与2A16合金同属Al-Cu-Mn系合金，主成分差别不大，2B16合金加少量V和Zr，在室温和高温下剪切强度比2A10合金优越。可热处理强化，适合在200℃或更高温度下长期使用。多用来制作铆钉，铆接性能良好。

主要成分（质量分数）为：Cu=5.8%~6.8%，Mn=0.2%~0.4%，V=0.05%~0.15%，Zr=0.10%~0.25%。详细成分见本篇第1章表2.1-15。

主要相组成物：α(Al)、θ($CuAl_2$)、T($Al_{20}Cu_2Mn_3$)、$TiAl_3$及少量杂质相。

2.8.2　物理及化学性能

1）热性能　热导率见表2.5-80。线胀系数见表2.5-81。

表 2.5-80　热导率

温度/℃	25	100	200	300	400
λ/W·$(m·K)^{-1}$	138	142	147	155	159

表 2.5-81　线胀系数

温度/℃	20~100	100~200	200~300	300~400
α/$10^{-6}K^{-1}$	22.6	24.7	27.3	30.2

2）密度（20℃）为 2.84 $g \cdot cm^{-3}$。

3）电性能　电阻率 ρ 为 61 $n\Omega \cdot m$。

4）磁性能　无磁性。

2.8.3　力学性能

1）技术标准规定的性能见表 2.5-82。

2）不同温度下的抗剪强度见表 2.5-83。

3）疲劳性能　室温轴向拉伸疲劳性能见表 2.5-84。

4）弹性性能　弹性模量 $E = 70$ GPa，切变模量 $G = 27$ GPa，泊松比 $\nu = 0.31$。

表 2.5-82　技术标准规定的性能

技术标准	品种	试样状态	d/mm	τ_b/MPa≥
GJB 2055—1994	线材	固溶热处理 535℃ + 人工时效 175℃，12 h	所有	275
Q/6S 113—1980		固溶热处理 525℃ + 人工时效 165℃，12 h	4	275
			6	265

表 2.5-83　不同温度下的抗剪强度

品种	试样状态	d/mm	稳定化处理		温度/℃	时间/min	τ/MPa
			温度/℃	时间/h			
线材	固溶热处理 535℃ + 冷拉 1%～3% 变形量 + 人工时效 175℃，18 h	4	—	—	185	30	194
					190		189
					200		184
					210		172
					220		156
	固溶热处理 535℃ + 人工时效 190℃，18 h	4	—	—	185	30	196
					190		187
					200		178
					210		169
					220		155
					250		115
	固溶热处理 535℃ + 冷拉 1%～3% 变形量 + 人工时效 175℃，18 h	4	220	100	220	30	139
	固溶热处理 535℃ + 人工时效 190℃，18 h	4	190	100	190	30	158
			200		200		148
			220		220		137
			250		250		109

表 2.5-84　疲劳性能

品种	试样状态	铆钉杆直径 d/mm	加载系数 K	径向 R	σ_{max}/MPa	频率 f /周·min^{-1}	寿命/周	样本 n
铆钉构件	固溶热处理 525℃ + 人工时效 165℃，12 h	4	0.6	0.1	802	83	1.71×10^5	1
							1.55×10^5	
							2.25×10^5	
			0.7		936		1.09×10^5	
							1.09×10^5	
							1.27×10^5	
	固溶热处理 525℃ + 人工时效 165℃，12 h + 稳定化处理 150℃，75 h + 175℃，5 h	4	0.6	0.1	802	111	2.28×10^5	1
							1.49×10^5	
							1.83×10^5	

2.8.4　工艺性能与要求

室温下线材具有良好的塑性，可在冷镦机上制成多种形式的铆钉。铆钉在热处理强化后施铆，具有良好的铆接工艺性能。施铆不受热处理强化后停留时间的限制。合金具有良好的焊接性能。用 2B16 作焊料，形成裂缝的倾向不显著。可以用点焊、滚焊和氩弧焊，品质良好。固溶热处理宜采用硝盐槽加热。铆钉应采用专用铁丝网容器盛装，铆钉摊厚不得超过 20 mm，入槽后，槽液温度不得低于固溶温度下限，以免产生粗大晶粒组织。淬火转移时间不得超过 15 s，以免降低耐腐蚀性能和抗剪强度。表面处理工艺与一般铝合金相同。合金在热处理强化状态下，具有良好的切削加工性能。

2.8.5　品种与应用

合金线材制作的铆钉，在航天产品高温区结构件的铆接上得到了多年应用，如大型导弹及大型运载火箭，使用表明满足设计要求。合金线材制作的铆钉也已成功用在航空产品上，用于耐热结构。

2.9　2A50合金

2.9.1　成分和组织

2A50合金为Al-Mg-Si-Cu系锻铝。该系合金是在Al-Mg-Si系基础上加铜，以抑制自然时效过程，增加人工时效效果。合金中含铜量属中等（1.8%～2.6%），强度也属于中等。热状态下塑性高，抗蚀性能、焊接性能、切削性能都良好，其缺点是有挤压效应，纵向和横向性能差别较大，有晶间腐蚀倾向。主要半成品为形状复杂的具有中等强度的锻件。

其主要成分（质量分数）为：Mg=0.4%～0.8%，Si=0.7%～1.2%，Cu=1.8%～2.6%，Mn=0.4%～0.8%。详细成分见本篇第1章表2.1-15。

主要相组成物：α(Al)、Mg_2Si、$CuAl_2$、W($Cu_4Mg_8Si_4Al_4$)，少量S(Al_2CuMg)；可能杂质相：$TiAl_3$、(FeMnSi)Al_6 等。

镁和硅形成强化相 Mg_2Si。铜和锰抑制自然时效过程，Al-Mg-Si系合金淬火后在室温停留会降低人工时效后合金强度，加铜和锰可弥补这一损失，$CuAl_2$ 和W相均参加了时效过程。铜还能增加合金的热塑性，抑制挤压效应，降低合金的各向异性，但使合金出现晶间腐蚀倾向。锰还可细化晶粒，扩大淬火温度上限，但增加了合金力学性能的各向异性。其他元素除钛起细化晶粒作用外，均作杂质控制。

2.9.2　物理及化学性能

1）热性能　热导率见表2.5-85。比热容见表2.5-86。线胀系数见表2.5-87。

表2.5-85　热导率

温度/℃	25	100	200	300	400
λ/W·(m·K)$^{-1}$	176	180	184	184	188

表2.5-86　比热容

温度/℃	50	100	150	200	250	300	350	400
c/J·(kg·K)$^{-1}$	795	837	837	879	921	963	1 005	1 005

表2.5-87　线胀系数

温度/℃	20～100	20～200	20～300	100～200	200～300
α/$10^{-6}K^{-1}$	21.4	22.6	23.8	23.7	26.2

2）密度（20℃）为2.75 g·cm^{-3}。

3）电性能　合金在20℃时的电阻率ρ为41 nΩ·m。

4）磁性能　无磁性。

2.9.3　力学性能

1）技术标准规定的性能见表2.5-88和表2.5-89。

表2.5-88　棒材力学性能

技术标准	品种	供应状态	d/mm	$σ_b$/MPa	$δ_5$/%
				≥	
GB/T 3191—1998	挤压棒材①	T6，T62	≤150	355	12
GB/T 3191—1998	高强棒材	T6，T62	20～120	380	10
GJB 2054—1994	高强棒材	T6	20～150	380	10

① 直径 d>150 mm的棒材，其力学性能附报告单。

表2.5-89　锻件力学性能

技术标准	品种	状态	纵向			长横向			高横向		硬度HB
			$σ_b$/MPa	$σ_{p0.2}$/MPa	$δ_5$/%	$σ_b$/MPa	$σ_{p0.2}$/MPa	$δ_5$/%	$σ_b$/MPa	$δ_5$/%	
			≥								
GJB 2351—1995	自由锻件	T6	365	—	8.0	345	—	6.0	335	4.0	95
GJB 2351—1995	模锻件	T6	380	275	10.0	365	245	7.0	345	5.0	100

2）冲击性能见表2.5-90。

表2.5-90　冲击性能

品种	状态	d/mm	试样方向	组织	a_{KU}/kJ·m^{-2}
挤压棒材	T6	180	轴向	—	235
			径向	—	59
			轴向	再结晶	225
			轴向	未再结晶	235

3）扭转与剪切性能　合金的抗剪强度τ=255 MPa。

4）持久和蠕变性能　高温拉伸性能见表2.5-91。高温持久性能见表2.5-92。

表2.5-91　高温拉伸性能

品种	δ/mm	状态	试样方向	温度/℃	$σ_b$/MPa	$δ_5$/%	ψ/%
锻件	110	T6	长横向	20	392	6	—
				125	353	7	—
				150	294	10	—
				200	275	13	40
				250	177	16	46
				300	98	23	70

表2.5-92　高温持久性能

品种	δ/mm	状态	试样方向	温度/℃	$σ_{100}$/MPa
锻件	110	T6	长横向	200	137
				250	59
				300	29

5）疲劳性能　高周疲劳寿命见表2.5-93。低周疲劳模锻件有穿流缺陷和无该缺陷的低周轴向拉伸疲劳寿命见表2.5-94。

表2.5-93　高周疲劳寿命

状态	温度/℃	寿命 N/周	$σ_{-1}$/MPa	$σ_{-1H}$/MPa
T6	20	$2×10^7$	127	78
	150	$2×10^7$	108	69
	200	$2×10^7$	98	59

6）弹性性能　弹性模量 E=71 GPa，切变模量 G=27 GPa，泊松比ν=0.33。

表 2.5-94　低周疲劳寿命

试样状态	径向 R	f/周·min^{-1}	加载系数 K	最大载荷/N	寿命 N/周
有穿流	0.1	10	0.67	11 768	11 303，5 281，8 265，9 358，10 453，9 842
无穿流	0.1	10	0.67	11 768	17 985，8 041，15 443，14 501，19 234，12 926，12 102

7）断裂性能见表 2.5-95。

表 2.5-95　断裂性能

品种	δ 或 d/mm	状态	试样方向	K_{IC}/MPa·$m^{1/2}$
自由锻件	—	T6	长横向 横长向 高横向	39～42 36～39 31～34
棒材	≤140		径向	31

2.9.4　抗蚀性

2A50 合金的一般抗蚀性较好，但是在人工时效状态下，如出现 $CuAl_2$ 相，则有晶间腐蚀倾向。应在阳极化处理或涂漆等保护下使用。

2.9.5　工艺参数

熔炼温度 720～750℃，铸造温度 715～730℃，均匀化退火温度 520℃，轧制温度 410～500℃，挤压温度 370～450℃，锻造温度 380～480℃，退火温度 350～400℃，固溶处理温度 520℃±5℃，过烧温度 545℃，人工时效规范：150～160℃，6～12h。

2.9.6　品种和用途

主要产品为锻件和棒材。用作各种形状复杂的中等强度的锻坯，适于制造飞机的隔框、接头、支架和摇臂等。

2.10　2B50 合金

2.10.1　成分和组织

2B50 合金是铝-铜-镁-硅系可热处理强化的铝合金，合金的化学成分除含有少量的铬、钛元素外，其他元素含量和 2A50 合金相当。2B50 合金除高温塑性比 2A50 合金好以外，其他各种性能基本和 2A50 合金相似。

2.10.2　物理及化学性能

1）热性能　热导率见表 2.5-96。比热容见表 2.5-97。线胀系数见表 2.5-98。

表 2.5-96　热导率

温度/℃	25	100	200	300	400
λ/W·$(m·K)^{-1}$	163	167	172	176	188

表 2.5-97　比热容

温度/℃	100	150	200	250	300	350	400
c/J·$(kg·K)^{-1}$	837	879	921	963	1 005	1 005	1 047

表 2.5-98　线胀系数

温度/℃	20～100	100～200	200～300	300～400	400～500
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	21.4	23.7	26.2	30.5	35.6

2）密度（20℃）为 2.75 g·cm^{-3}。

3）电性能　电阻率 ρ 为 43 nΩ·m。

4）磁性能　无磁性。

2.10.3　力学性能

1）技术标准规定的性能，见表 2.5-99 和表 2.5-100。

表 2.5-99　棒材力学性能

技术标准	品种	供应状态	d/mm	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%
				≥		
HB 5202—1982	挤压棒材	T6	≤22	365	—	12.0
			23～160	375	—	10.0
			161～240	365	—	8.0

2）压缩性能　锻件的典型压缩性能：σ_{bc} = 1 175 MPa，非比例缩短 $\sigma_{pc0.2}$ = 335 MPa，相对缩短率为 50%。

3）冲击性能见表 2.5-101。

4）扭转与剪切性能见表 2.5-102。

5）疲劳性能　高周疲劳见表 2.5-103。

表 2.5-100　锻件力学性能

技术标准	品种	状态	纵向			长横向			高横向		HBS
			σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	δ_5/%	
			≥								
GJB 2351—1995	自由锻件	T6	365	—	8.0	345	—	6.0	335	4.0	95
	模锻件	T6	380	275	10.0	365	245	7.0	345	5.0	100

表 2.5-101　冲击性能

品种	状态	试样部位	纵向 a_{KU}/kJ·m^{-2}	长横向 a_{KU}/kJ·m^{-2}
模锻件	T6	轮毂 叶身	147 235	88 117

表 2.5-102　扭转与剪切性能

品种	状态	τ_b/MPa	$\tau_{0.3}$/MPa	τ/MPa
锻件	T6	335	195	255

表 2.5-103　高周疲劳

品种	状态	温度/℃	寿命/周	σ_{-1}/MPa	σ_{-1H}/MPa
锻件	T6	20	2×10^7	127	78
模锻件	T6	150 200	2×10^7 2×10^7	108 98	69 59

6）弹性性能　锻件 T6 状态下弹性模量 E = 71 GPa，锻件 T6 状态下切变模量 G = 27 GPa，锻件的泊松比 ν = 0.33。

2.10.4 工艺参数

2B50合金和2A50合金工艺参数相似。熔炼温度700～750℃，铸造温度715～730℃，挤压温度370～450℃，锻造温度420～470℃。退火温度340～410℃，以不大于30℃/h的冷却速度随炉冷却到260℃出炉空冷。固溶处理温度505～525℃，水淬。人工时效150～165℃，保温6～15 h（视零件而定）。

2.10.5 品种和用途

2B50合金用于制造形状复杂的锻件，如压气机叶轮、导流叶轮、叶轮及其他零件等。

2.11 2A70合金

2.11.1 成分和组织

2A70合金为Al-Cu-Mg-Fe-Ni系锻铝。其特点是：有良好的耐热性能，热状态下的塑性高。临界变形度小（2%～4%），可焊性和抗蚀性都较差。但由于铸造和压力加工时（无论是锻造、挤压、轧制）都有好的工艺性能，加上良好的耐热性能，使之广泛用于200～250℃航空发动机及其他高温工作的零件。

其主要成分（质量分数）为：Cu＝1.9%～2.5%，Mg＝1.4%～1.8%，Fe＝0.9%～1.5%，Ni＝0.9%～1.5%，Ti＝0.02%～0.1%。详细成分见本篇第1章表2.1-15。

主要相组成物：Fe:Ni＝1:1时有α(Al)、S(Al_2CuMg)、Al_9FeNi、Mg_2Si。当Fe＞Ni时，有Al_7Cu_2Fe相。当Ni＞Fe时有AlCuNi相。

2.11.2 物理性能

1）热性能　热导率见表2.5-104。比热容见表2.5-105。线胀系数见表2.5-106。

表2.5-104 热导率

温度/℃	25	100	200	300	400
λ/W·(m·K)$^{-1}$	142	146	151	159	163

表2.5-105 比热容

温度/℃	100	150	200	250	300	350	400
c/J·(kg·K)$^{-1}$	795	837	837	879	921	921	963

2）密度（20℃）为2.8 g·cm^{-3}。

3）电性能　室温电阻率ρ为55 nΩ·m。

4）磁性能　无磁性。

2.11.3 力学性能

1）技术标准规定的性能见表2.5-107。

表2.5-106 线胀系数

温度/℃	-23	0	20～100	20～200	20～300	100～200	200～300	300～400
α/10^{-6}K^{-1}	14.7	19.7	19.7	21.7	23.2	22.4	23.9	24.8

表2.5-107 力学性能

技术标准	品种	状态	d/mm	方向	σ_b/MPa	δ_5/%	HBS
GB/T 3191—1998	挤压棒材	T6	≤150	纵向	355	8	—
GJB 2054—1994	棒材	T6	5～150 ＞150～250	纵向	355 345	8 6	—
GJB 2351—1995	自由锻件和模锻件	T6	—	纵向 长横向 高横向	375 375 375	4.0 4.0 4.0	110

2）硬度　室温下T6状态小型模锻件的典型硬度139HBS；中型模锻件130HBS。

3）各种温度下的拉伸性能见表2.5-108。

表2.5-108 各种温度下拉伸性能

品种	状态	δ/mm	温度/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ/%
薄板	T6	1.5～2	-196	500	412	13
			-70	420	353	7
			20	387	343	7
			125	363	333	7
			150	363	323	9
			175	323	294	11
			200	304	255	14
			250	235	186	19
挤压件	T6	—	-196	490	431	12
			-70	431	392	9
			20	412	353	7
			150	353	323	7
			200	313	284	10
			250	245	225	11

续表2.5-108

品种	状态	δ/mm	温度/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ/%
模锻件	T6	纵向	20 250	415 262	282 —	19.6 8.6
		横向	20 250	408 283	275 —	10.8 7.0

4）冲击性能　各种制品冲击性能见表2.5-109。

表2.5-109 冲击性能

品种	试样方向	a_{KU}/kJ·m^{-2}			样本 n
		均值 $\bar{X}$	min	max	
模锻件	纵向 长横向	277 211	183 187	267 267	5 5
挤压件	—	119	—	—	—
薄板 型材 厚板 40～70mm	 长横向 高横向 	58 122 49 24	— 98 39 19	— 147 58 29	

5）剪切性能 模锻件典型剪切性能见表2.5-110。

表 2.5-110 剪切性能

品种	试样方向	剪切强度 τ/MPa			样本 n
		均值 $\overline{X}$	min	max	
模锻件	纵向	275	266	289	5
	长横向	291	276	305	5

6）持久和蠕变性能 高温持久性能见表2.5-111。高温蠕变性能见表2.5-112。

表 2.5-111 高温持久性能

品种	状态	方向	温度/℃	σ_{10}/MPa	σ_{100}/MPa	σ_{1000}/MPa
板材	T6	—	150	284	245	216
			175	235	206	157
型材	T6	—	150	304	265	235
			175	275	226	196
模锻件	T6	纵向	250	—	102	—
		长横向	250	—	102	—

表 2.5-112 高温蠕变性能

品种	状态	温度/℃	$\sigma_{0.2/10}$/MPa	$\sigma_{0.2/100}$/MPa	$\sigma_{0.2/1000}$/MPa
大型材	T6	125	270	255	216
		150	235	206	—
		175	201	—	—
		200	157	118	—
薄型材	T6	125	284①	235①	210①
		150	245①	—	—
		175	196	—	—
		200	—	88	—
薄板	T6	125	245	206～216	147
		150	216	167	—
		175	137～147	—	—
		200	88	—	—

① 系锻坯轧板数据。

7）疲劳性能 旋转弯曲疲劳性能见表2.5-113。

表 2.5-113 疲劳性能

品种	状态	加载方式	寿命/周	σ_{-1}/MPa	σ_{-1H}/MPa
大型材	T6	悬臂式	2×10^6	147	98
			2×10^7	117	78
			5×10^7	98	69
锻坯轧板	T6	悬臂式	2×10^6	147	—
			2×10^7	127	—
		纯弯曲	2×10^6	127	83
			2×10^7	127	69
包铝板	T6	—	2×10^6	107	78
			2×10^7	102	74
			5×10^7	98	69

8）弹性性能 弹性模量见表2.5-114。
9）断裂性能 断裂韧度见表2.5-115。

表 2.5-114 弹性模量

品种	状态	d/mm	温度/℃	E_D/GPa
轧板	T6	—	20	70
			150	59
			200	54
			250	49
挤压件	T6	—	20	72
			150	64
			200	59
			250	54
棒材	T6	120	20	71
			125	67
			175	64
			215	61

表 2.5-115 断裂韧度

品种	状态	δ/mm	试样方向	温度/℃	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$
轧制厚板	T6	65	长横向	20	31.6
				-196	36.7
			高横向	20	27.8
				-196	33.8
			高长向	20	25.0
				-196	30.8
挤压带材	T6	42×250	长横向	20	27.6
				-196	29.8
薄板	T6	2	长横向	20	53.6①
			(α=45°)		54.6
			短横向		58.3

① 薄板为 K_C 值。

2.11.4 焊接性能

一般来说焊接性能较差。不能气焊、钎焊，氩弧焊可用，点焊和滚焊稍好一些。合金的铜、镁含量都处于焊接裂纹敏感性最大值附近，为减小裂纹危险性，可用4A01合金作填加料，但对强度和抗蚀性有一定的影响。

2.11.5 抗蚀性

抗蚀性差是2A70合金的一个主要缺点。由于强化相比较复杂，容易发生电化学腐蚀，且有应力腐蚀倾向，需用阳极化、涂漆保护。

2.11.6 工艺参数

熔炼温度720～760℃，铸造温度715～730℃。挤压温度370～450℃，锻造温度380～480℃。固溶处理温度520～535℃，过烧温度545℃。人工时效规范：190℃±5℃，20 h。无自然时效能力。退火温度380～430℃，缓慢冷却。

2.11.7 品种和用途

主要产品为锻件、棒材，亦可轧成板材。用于航空发动机以及其他高温下工作的零件，板材可作高温结构材料。

2.12 2014合金

2.12.1 成分和组织

2014合金为Al-Cu-Mg-Si可热处理强化最重要的锻造铝合金，其成分与2A14合金相近，主要强化相是 Mg_2Si 和 $CuAl_2$，也有少部分S相。强度比2A50合金高，与2A12合金相同，故也称高强度硬铝。因合金中有S相，Mn含量比2A50合金高，有较高的耐热性。

2014合金的共晶组织比2A11和2A12合金多，铸锭的热裂倾向小，并有高的热塑性、耐热性和可焊性，适合制造锻

件。

其化学成分（质量分数）为：Cu = 3.9% ~ 5.0%，Mg = 0.2% ~ 0.8%，Si = 0.5% ~ 1.2%，Mn = 0.4% ~ 1.2%。详细成分见本篇第1章表2.1-15。

焊接性能和抗蚀性参见本章2.6节2A14合金。

2.12.2 物理及化学性能

1）热性能 热导率见表2.5-116。比热容见表2.5-117。线胀系数见表2.5-118。

表2.5-116 热导率

试验温度/℃	20	100	200	300	400
λ/W·(m·K)$^{-1}$	159	168	176	180	180

表2.5-117 比热容

温度/℃	100	200	300	400
c/J·(kg·K)$^{-1}$	831	880	964	1 090

表2.5-118 线胀系数

试验温度/℃	-50 ~ 20	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	100 ~ 200	200 ~ 300
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	21.6	22.5	23.6	24.5	24.7	26.3

2）密度（20℃）为2.8 g·cm^{-3}。

3）电性能 T6状态下电阻率ρ为43 nΩ·m。

4）磁性能 无磁性。

2.12.3 力学性能

1）技术标准规定的性能见表2.5-119。

2）硬度 棒材和自由锻件的硬度值见表2.5-120。

3）疲劳性能 ϕ65 mm棒材T6状态，K_t = 1的光滑纵向试样，应力比R = 0.05，试验频率f = 120 ~ 135 Hz，轴向高周疲劳性能见表2.5-121。

自由锻件（60 mm × 120 mm × 180 mm）T6状态，K_t = 1的光滑横向试样，应力比R = 0.1，试验频率f = 120 ~ 135 Hz，轴向高周疲劳性能见表2.5-122。

表2.5-119 棒材和锻件的力学性能

品种	技术标准	状态	d/mm	试样方向	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	HBS
					≥			
棒材	Z9—0409—1992 Q/EL 336—1992	T6	≤75	纵向	490	440	7	125
			>75 ~ 100		480	435	7	
		T4	≤75		410	270	12	—
			>75 ~ 100		400	260	12	
锻件	Q/S 819—1992	T6	—	纵向	450	380	7	125
				长横向	440	380	3	

表2.5-120 棒材和锻件的硬度

品种	尺寸/mm	状态	HBS
棒材	直径 d65	T6	141
	直径 d80	T6	159
	直径 d100	T6	152
自由锻件	60 × 120 × 180	T6	156

表2.5-121 棒材高周疲劳性能

试验方法	σ_{max}/MPa	寿命 $N/10^3$ 周	
升降法	314	963，311	指定寿命 $N = 10^7$ σ = 307.33 MPa γ = 95%
	309	>10^4，2 141，9 872，6 496，>10^4，>10^4	
	304	8 374，>10^4，>10^4 >10^4，>10^4	
	299	>10^4	

表2.5-122 锻件高周疲劳性能

试验方法	σ_{max}/MPa	寿命 $N/10^3$ 周	
升降法	324.3	524.857	指定寿命 $N = 10^7$ 周 σ = 303.15 MPa γ = 95%
	310.1	>10^4，252，>10^4，385	
	296.1	645，>10^4，126，>10^4	
	282.0	>10^4，>10^4	

4）弹性性能 T6状态合金拉伸弹性模量见表2.5-123。T6状态合金锻件、板材的切变模量G = 27 GPa，泊松比ν = 0.33。

表2.5-123 弹性模量

品种	规格 d/mm	试样方向	E/GPa	试样数量
棒材	65	纵向	73	4
自由锻件		纵向	72	2
		长横向	72	4

2.12.4 工艺参数

熔炼温度700 ~ 750℃，铸造温度715 ~ 730℃，轧制温度390 ~ 430℃，挤压温度400 ~ 450℃，锻造温度380 ~ 480℃。固溶处理温度495 ~ 510℃，人工时效温度160℃ ± 3℃。

2.12.5 品种和用途

该合金用于制造形状复杂的自由锻件和模锻件以及板、棒、型材。可用作大型框架、桥梁、大型外壳、货车构件，以及铆钉和其他构件等。

2.13 2024和2124合金

2.13.1 成分和组织

2024、2124合金的成分和组织与2A12合金相同，仅2124合金中杂质Fe、Si的含量限制较低。减少有害相的数量，使2124合金厚板的伸长率和断裂韧度特别是短横向的更好。成分详见本篇第1章表2.1-15。

2.13.2 物理性能

1）热性能 热导率见表2.5-124。比热容（20℃）：2024合金为875 J·(kg·K)$^{-1}$；2124合金882 J·(kg·K)$^{-1}$。线胀系数见表2.5-125。

表 2.5-124 热导率

合金	20℃热导率 λ/W·(m·K)$^{-1}$		
	O 状态	T3、T4 状态	T6、T851 状态
2024	190	120	151
2124	191	—	152

表 2.5-125 线胀系数

合金	各温度范围线胀系数 $\alpha/10^{-6}K^{-1}$			
	-50~20	20~100	20~200	20~300
2024	21.1	22.9	23.8	24.7
2124	21.1	22.9	23.8	24.7

2）密度 ρ　2024 和 2124 合金为 2.77 $g \cdot cm^{-3}$。

3）电性能　电阻率见表 2.5-126。电导率见表 2.5-127。

4）磁性能　无磁性。

2.13.3 力学性能

1）技术标准规定的性能见表 2.5-128。

表 2.5-126 电阻率

合金	20℃电阻率 ρ/nΩ·m		
	O	T3、T4、T351	T62、T72、T851
2024	34	57	45
2124	34.5	—	—

表 2.5-127 电导率

合金	20℃体积电导率/%IACS		
	O	T3、T6、T351	T6、T81、T851
2024	50	30	38
2124	50	—	39

2）室温及各种温度下的力学性能

① 硬度　2024 合金厚板的硬度值见表 2.5-129。

② 拉伸性能　2024 合金厚板、薄板、挤压矩形棒材的典型室温拉伸性能见表 2.5-130。不同温度下的典型拉伸性能见表 2.5-131。

表 2.5-128 技术标准规定的力学性能

合金	技术标准	品种	状态	d 或 δ/mm	取样方向	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%
						≥		
2024	GJB 2920—1997	棒材	T3 T4	直径 d10~25	纵向	415	305	12
				>25~75		450	315	10
				>75~120		485	360	10
	Q/6S 717—1989	厚板	T351	6.5~45	长横向	434	290	8
			T851			448	386	5
	Q/6S 717—1990	薄板	T62	1.0~6.3	长横向	427	336	(δ_{10}) 5
	G/6S 840—1990	挤压矩形棒材	T3510	(50~75)×(255~300)	纵向	483	359	10
2124	Q/S 116—1990 Q/6S 789—1990	厚板	T851	25~45	纵向 长横向 短横向	455 455 440	393 393 380	6 5 1.5

表 2.5-129 2024 合金硬度

品种	状态	δ/mm	HBS
挤压棒	T351	23	135
	T851		147

表 2.5-130 2024 合金力学性能

品种	状态	δ/mm	取样方向	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ①/%
厚板	T351	23	纵向 长横向	472 471	367 310	18.1 17.0
		25	纵向 长横向	507 487	405 349	16.6 18.4
	T851	23	纵向 长横向	499 490	472 456	7.0 5.6
		25	纵向 长横向	520 510	488 482	9.4 7.2
薄板	T3	1.4	纵向 长横向	442 440	329 310	18.4 17.7

续表 2.5-130

品种	状态	δ/mm	取样方向	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ①/%
薄板	T3	1.8	纵向 长横向	467 458	333 320	20.4 20.6
	T36	2.0	纵向	466	349	12.6
	T62	1.6	长横向 长横向	476 463	376 363	11.0 12.0
		2.0	长横向	420	362	9.4
	T72	2.0	长横向	408	353	7.0
	T81	1.6	纵向 长横向	471 469	432 440	6.5 6.7
		1.5	长横向	447	416	6.8
	T86	2.0	长横向	487	458	6.4
挤压矩形棒材	T3510	50×300	纵向	532	410	15.3
	T8510		纵向	500	452	9.3

① 薄板为 δ_{10}，其他为 δ_5。

表 2.5-131 不同温度下的拉伸性能

品种	状态	取样方向	试验温度/℃	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ① /%	ψ /%
2024 合金厚板 δ25 mm	T351	长横向	125	420	295	14.2	19.3
			175	380	278	15.3	22.9
			250	274	260	11.1	29.7
			300	168	155	16.3	50.0
	T851		125	438	416	7.0	15.8
			175	382	371	8.3	16.7
			250	276	260	11.4	27.3
			300	174	162	13.8	39.1
2024 合金薄板 δ1.5 mm	T62	长横向	125	361	321	15.0	—
			175	313	282	19.0	—
			250	206	176	18.0	—
			300	130	100	26.0	—
薄板 δ2 mm	T62		200	303	268	12.4	—
薄板 δ2.5 mm	T71		200	278	259	12.7	—
薄板 δ1.5 mm	T81	纵向	125	384	360	13.6	—
			175	329	300	16.9	—
			250	234	193	19.2	—
			300	143	115	24.0	—
2024 合金挤压矩形棒材(500 mm×300 mm)	T3510	纵向	125	487	388	16.1	20.6
			175	448	365	16.7	27.1
			250	283	255	13.8	46.5
			300	175	154	18.3	61.4
2124 合金厚板 38 mm	T851	长横向	125	420	400	10.2	22.5
			150	400	380	10.5	27.5
			175	370	355	13.0	29.8
			200	340	325	13.5	33.5

① 薄板为 δ_{10}，其他为 δ_5。

③ 压缩性能 不同制品的室温压缩性能见表 2.5-132。

表 2.5-132 压缩性能

品种	状态	δ/mm	取样方向	$\sigma_{pc0.2}$/MPa
2024 合金厚板	T851	23	纵向	459
			长横向	470
2024 合金挤压矩形棒材	T3510	50×300	纵向	330
	T8510			438
2124 合金厚板	T851	38	纵向	440
			长横向	445

④ 冲击性能 不同制品的冲击性能见表 2.5-133。

表 2.5-133 冲击性能

品种	状态	δ/mm	试验温度/℃	取样方向	a_{KU} /kJ·m^{-2}
2024 合金厚板	T351	23	室温	短横向	114
		25			163
	T851	23		短横向	45
		25			54
2024 合金挤压矩形棒材	T3510	50×300		长横向	219
	T8510				89
2124 合金厚板	T851	38		短横向	98
				长横向	185

⑤ 扭转与剪切性能 不同制品的室温扭转性能见表 2.5-134。

表 2.5-134 扭转性能

品种	状态	δ /mm	取样方向	τ_b /MPa	$\tau_{p0.3}$ /MPa	$\tau_{p0.015}$ /MPa
2024 合金厚板	T351	23	纵向	405	222	159
			长横向	396	215	—
	T851		纵向	387	306	237
			长横向	374	298	—
2024 合金挤压矩形棒材	T3510	50×300	纵向	383	204	151
	T8510			361	288	232
2124 合金厚板	T851	38	长横向	380	500	230

3）弹性性能

① 室温拉伸弹性模量 E 2024 合金为 72 GPa；2124 合金为 72 GPa。

② 切变模量 2024 合金切变模量见表 2.5-135。

表 2.5-135 2024 合金切变模量

品种	状态	δ/mm	取样方向	G/GPa
厚板	T351	25	纵向	26
			长横向	27
	T851		纵向	27
			长横向	27
挤压矩形棒材	T3510	50×300	纵向	26
	T8510			26

③ 泊松比 2024 合金为 0.31，2124 合金为 0.33。

4）断裂性能 平面应变断裂韧度见表 2.5-136。

表 2.5-136 断裂韧度

品种	状态	试样尺寸/mm		取样方向	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$
		B	W		
2024 合金挤压矩形棒材	T3510	40	80	长横向	36.8
				短横向	29.5
	T8510	40	80	长横向	25.2
				短横向	20.1
2124 合金厚板	T851	38		长横向	32.6
				短横向	25.3

2.13.4 焊接性能

合金的熔焊性能较差，进行气焊和氩弧焊时，有形成结晶裂缝的倾向。该合金在各热处理状态下具有好的接触焊焊接性能。

2.13.5 抗蚀性

合金抗蚀性较差，对应力腐蚀、晶间腐蚀和剥落腐蚀都比较敏感。2124 合金 T851 状态厚板无剥落腐蚀倾向，抗应力腐蚀性能良好。

2.13.6 工艺参数

2021、2124 合金工艺参数参阅本章 2.5 节 2A12 合金。

2124 合金在固溶处理后 4 h 内，时效处理前进行预拉伸变形，永久变形量为 1.5%～3.0%，以消除残余应力。预拉伸后不允许再矫直。

2.13.7 品种和用途

2024 合金薄板、厚板和型材已成功地用于制造飞机、火箭的蒙皮、舱段、整体油箱壁板、翼梁等。2124 合金厚板适于制作要求耐热、耐蚀和承受较大应力的结构件，也可加工成代替锻件的构件。

编写：郑子樵（中南大学）
审稿：唐仁政（中南大学）

第6章 3×××系铝合金

1 概述

3×××系铝合金为热处理不可强化的铝-锰合金。锰既能提高合金的力学性能而又不使合金的抗蚀性能下降。铝-锰合金在半连续铸造（DC）时有发生晶内偏析的倾向，锰提高合金的再结晶温度。向铝-锰合金中添加少量铜，对合金的抗蚀性提高有利，可由点腐蚀变成全面的均匀腐蚀。锰还可减少含铁相的脆化作用，即可使针状或片状的含铁的化合物变成脆性较低的块状化合物。在3×××系铝合金中锰可单独加入，也可与镁一同加入。应严格控制3003及3004合金的铁、锰总量，使之分别低于约2.0%和1.7%，以免铸造时形成粗大的$(FeMn)Al_6$化合物。

3×××系铝合金塑性高，焊接性能好，加工性能好，强度比1×××系合金高，而抗腐蚀性接近于纯铝。

3×××系铝合金的抗腐蚀性能优良，是因为$MnAl_6$的电极电位与纯铝的电极电位实际上相等（均为-0.86 V）。合金的成形性，不论退火状态或冷作硬化状态都与1×××系铝合金相似，但是要求含锰相的分布必须均匀。

3003合金是含有1.2%Mn的合金，比1100合金强度高。在成形性方面，特别是拉伸性好，广泛用于低温装置、一般器皿和建筑材料等。

3004、3104、3204、3105是铝-锰系添加镁的合金。添加镁有提高强度的效果，又有抑制再结晶晶粒粗大化的倾向，能够使铸块加热处理简单化，所以能在板材的制造上，产生有利的作用。这些合金适用于制作建筑材料和电灯灯口，也大量用于制作饮料罐。

国际注册3×××系铝合金有30余个牌号，我国国家标准中列有6个牌号。关于3×××系铝合金的牌号和成分详见本篇第1章表2.1-15。

2 合金各论

2.1 3003合金

2.1.1 成分和组织

3003合金应用广泛，是典型的防锈铝合金。其突出特点是抗蚀性好，强度比工业纯铝高，塑性不比工业纯铝差，焊接性能优良。导电和导热性能比工业纯铝低。Mn在Al中虽然有一定的固溶度，但仅有一定的固溶强化和$MnAl_6$相质点强化效果，因此为热处理不可强化的铝合金。

3003合金主要成分（质量分数）为：Mn = 1.0%～1.5%，还含有少量Cu（0.05%～0.20%）。详细成分见本篇第1章表2.1-15。合金主要相组成物为α(Al)和$MnAl_6$，可能还有杂质相$(FeMn)Al_6$或$(FeMnSi)Al_6$等。

2.1.2 物理性能

1）密度（20℃）为2.73 g/cm³。

2）热学性能见表2.6-1。

表2.6-1 3003合金的热学性能

液相线温度/℃	固相线温度/℃	线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$		体胀系数（20℃）/$10^{-6}K^{-1}$	比热容（20℃）/J·(kg·K)$^{-1}$	热导率（20℃）/W·(m·K)$^{-1}$
		温度/℃	平均值			
654	643	-50～20	21.5	67	893	O：193
		20～100	23.2			H12：163
		20～200	24.1			H14：159
		20～300	25.1			H18：155

3）电学性能见表2.6-2。

表2.6-2 3003合金（20℃）电学性能

状态	电导率/%IACS	电阻率/nΩ·m	电阻温度系数/(nΩ·m)·K^{-1}
O	50	34	0.1
H12	42	41	
H14	41	42	
H18	40	43	

2.1.3 力学性能

1）各种状态下力学性能见表2.6-3。

表2.6-3 3003合金的力学性能

状态与厚度	抗拉强度 σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	HBS	抗剪强度 τ/MPa	疲劳强度[①] σ_{-1}/MPa
典型性能						
O	110	42	30～40	28	76	48
H12	130	125	10～20	35	83	55
H14	150	145	8～15	40	97	62
H16	175	175	5～14	47	105	69
H18	200	185	4～10	55	110	69

① R.R.Moore试验，5×10^8次循环。

2）不同温度下的力学性能见表2.6-4。

表2.6-4 3003合金不同温度下的力学性能

温度/℃	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%
-200	O	230	60	46
-100		150	52	43
-30		115	45	41
25		110	41	40
100		90	38	43
200		60	30	60
300		29	17	70
400		18	12	75
-200	H14	250	170	30
-100		175	155	19
-30		150	145	16
25		150	145	16
100		145	130	16
200		96	62	20
300		29	17	70
400		18	12	75

续表 2.6-4

温度/℃	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%
-200	H18	290	230	23
-100		230	210	12
-30		210	190	10
25		200	185	10
100		180	145	10
200		96	62	18
300		29	17	70
400		18	12	75

2.1.4 焊接性能

3003合金焊接性能良好，锰对焊接裂纹没有明显影响，在焊接工艺方面，可与工业纯铝归为一类。钎焊、气焊、电阻焊、电弧焊的可焊性均良好，气焊时应采用适当的焊剂以形成弱还原性气氛，最好采用氩弧焊。焊件作为一般结构件或用于储存过氧化氢的容器时，用1200合金作填充金属，可适应不同使用温度，焊缝的平均抗拉强度为110 MPa，最低抗拉强度约96 MPa，伸长率为24%。

2.1.5 抗蚀性

3003合金的抗蚀性与工业纯铝的相近。锰加入铝中，除部分固溶外，主要形成$MnAl_6$化合物，而$MnAl_6$的电极电位与固溶体的电极电位相等（-0.86 V）。铝中加入锰，仅使纯铝的抗蚀性略有降低，但另一方面，锰可调节工业纯铝中铁的有害影响，形成$(FeMn)Al_6$，减少$FeAl_6$对抗蚀性能的有害影响。3003合金有很好的耐大气腐蚀性能，对淡水、海水、食品、有机酸、酒精、汽油、中性无机盐水溶液等均具有好的抗蚀性，但应注意介质中某些杂质的影响。在1:5的稀酸中的抗蚀性还优于工业的纯铝的。

冷变形状态下，3003合金有剥落腐蚀倾向，且随冷加工程度的增加而增加。其原因是冷变形过程中，坚硬的$MnAl_6$化合物周围可能形成显微缺陷，虽然$MnAl_6$的体积百分数很小，但工艺不当时足以引起剥落腐蚀。

阳极氧化过程中，$MnAl_6$不会溶解，而被Al_2O_3膜覆盖，由于$MnAl_6$不可能分布得十分均匀，因而会造成阳极氧化后色彩的局部不均匀，故3003合金一般不进行阳极氧化处理。

2.1.6 工艺性能与参数

熔炼温度730~770℃，铸造温度720~730℃。均匀化温度590~620℃，热轧温度480~520℃（最佳500℃），挤压温度320~480℃。典型退火温度413℃，空气冷却。

3003合金加工工艺上的一个显著特点是，合金在铸造时锰容易产生严重的晶内偏析，使再结晶退火时产生粗大的晶粒。从Al-Mn相图可以看出，液相线和固相线的垂直距离很小，几乎和纯铝的熔点一样，而水平距离却很大，即在结晶过程中固相和液相的成分差别大，因而容易产生晶内偏析。锰的浓度在晶粒中心部位低，边缘部位高，即使长时间均匀化退火也不可能完全消除这种偏析，致使在冷加工过程中由于含锰量的差异而使晶粒不同部位出现不均匀变形。锰又能显著提高再结晶温度，因而冷变形后在慢速的再结晶退火过程中，原晶粒中心部位首先再结晶和晶粒长大，形成粗大晶粒，并造成显微组织的不均匀性。凡能降低锰晶内偏析的措施都可防止和/或减小晶粒粗化的倾向。

1）高温均匀化退火，使固溶体内锰含量趋于均匀，并配以大的冷变形度使再结晶形核均匀，从表2.6-5可以看出，600℃均匀化退火，冷变形度在70%以上者可以获得细晶粒。

表 2.6-5 均匀化退火和冷变形度对3003板材再结晶晶粒度的影响（再结晶退火：500℃，1h）

铸锭状态	平均晶粒度/个·cm^{-2}				
	冷变形 60%	冷变形 70%	冷变形 80%	冷变形 90%	冷变形 95%
未均匀化	20~30	20~30	30~60	40~50	100~150
600℃均匀化	150~250	300~600	400~700	400~700	400~700

2）高温热轧，热轧温度提高至480~520℃，其效果可与高温均匀化退火的效果相近。

3）高温快速再结晶退火。未进行高温均匀化或高温热轧的材料，可采用盐浴或感应加热，温度高于500℃，短时间完成再结晶。

4）添加适量钛有明显作用。因为钛偏析与锰偏析的方向相反，而影响相同，故能起到部分抵销作用。

2.1.7 品种和用途

3003合金可加工成各种半成品，如板、带、箔、管、棒、线、型材和锻件，是一种具有优良塑性和抗蚀性以及中等强度的通用合金。

主要用作压力罐、储藏箱、饮料罐、热交换器、化工设备、飞机油箱、油路导管、反光板、屋面板、厨房设备、洗衣机缸体、铆钉、焊丝等。

2.2 3004合金

2.2.1 成分和组织

3004合金与3003合金主要成分相同，w_{Mn}均为1.0%~1.5%，所不同的是，3004合金中的Cu不是必验成分，控制Cu不能大于0.25%，另一个区别是加入0.8%~1.3%Mg。加入Mg能起固溶强化作用，少量Mg还能细化Al-Mn合金退火的晶粒，但对表面光泽度有影响。

3004合金详细成分见本篇第1章表2.1-15。其主要相组成为α(Al)、$MnAl_6$，可能还有$(FeMn)Al_6$或$(FeMnSi)Al_6$等。

2.2.2 物理性能

1）密度（20℃）为2.72 g/cm³。

2）热学性能见表2.6-6。

3）电学性能 20℃，O状态，电导率42%IACS，电阻率41 nΩ·m，电阻温度系数0.1（nΩ·m）·K^{-1}。

2.2.3 力学性能

1）各种状态下的力学性能见表2.6-7。

表 2.6-6 3004合金热学性能

液相线温度/℃	固相线温度/℃	线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$		体胀系数（20℃）/$10^{-6}K^{-1}$	比热容（20℃）/J·(kg·K)$^{-1}$	热导率（20℃）/W·(m·K)$^{-1}$
		温度/℃	平均值			
654	629	-50~20	21.5	67	893	O：162
		20~100	23.2			
		20~200	24.1			
		20~300	25.1			

表 2.6-7　3004 合金的力学性能

状态	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ/%	硬度 HBS	抗剪强度 τ /MPa	疲劳强度 σ_{-1} /MPa
典型性能						
O	180	69	20~25	45	110	97
H32	215	170	10~17	52	115	105
H34	240	200	9~12	63	125	105
H36	260	230	5~9	70	140	110
H38	285	250	4~6	77	145	110

2）不同温度下的力学性能见表 2.6-8。

3）Mg 对 Al-Mn 合金力学性能的影响见表 2.6-9。

表 2.6-8　3004 合金不同温度下的力学性能

温度/℃	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%
-200	O	290	90	38
-100		200	80	31
-30		180	69	26
25		180	69	25
100		180	69	25
200		96	65	55
300		50	34	80
400		30	9	90

续表 2.6-8

温度/℃	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%
-200	H34	360	235	26
-100		270	212	17
-30		245	200	13
25		240	200	12
100		240	200	12
200		145	105	35
300		50	34	80
400		30	19	90
-200	H18	400	295	20
-100		310	267	10
-30		290	245	7
25		280	245	6
100		275	245	7
200		130	105	30
300		50	34	80
400		30	19	90

2.2.4　主要用途

制作全铝易拉罐罐身，要求比 3003 合金强度高的零部件，化工产品生产和储存装置，薄板加工件，建筑工具，各种灯具零部件。

表 2.6-9　镁含量对 Al-Mn 合金力学性能的影响

元素含量（质量分数）/%				状态	抗拉强度 σ_b	屈服强度 $\sigma_{0.2}$	伸长率 δ /%	硬度 HB
Mg	Mn	Si	Fe		MPa			
—	1.51	0.12	0.24	H18 O	224 110	203 56	3.6 34.3	51 28
0.29	1.50	0.11	0.19	H18 O	270 132	250 70	3.1 27.6	63 35
0.47	1.50	0.12	0.23	H18 O	289 146	268 74	4.1 24.5	73 39
0.8~1.3	1.0~1.5	0.3	0.7	H18 O	288 181	252 70	5 20	77 45

2.3　3A21 合金

2.3.1　成分和组织

3A21 合金也就是通常认为的 3003 合金，成分略有差别，其他各方面均相似或相同，参阅本章 2.2 节 3003 合金部分。

Al-Mn 合金在板材退火时，掌握不好易出现大晶粒，这是多年来很多企业都遇到而且不好解决的问题。铸锭均匀化处理和冷变形对 3A21 合金板晶粒度有明显影响，掌握这两个因素有可能解决大晶粒问题。

2.3.2　铸锭均匀化和冷变形的影响

铸锭均匀化处理和冷变形对 3A21 合金板材晶粒度的影响见表 2.6-10。

2.3.3　品种规格与供应状态（表 2.6-11）

2.3.4　力学性能

1）技术标准规定的性能见表 2.6-12。

2）不同温度下的力学性能见表 2.6-13。

2.3.5　主要用途

制作飞机油箱、油路导管、铆钉线材等，以及建筑材料和食品工业装备等。

表 2.6-10　铸锭均匀化和冷变形对 3A21 合金板材晶粒度的影响（500℃，1h 退火）

冷变形度/%	未均匀化	600℃均匀化
	晶粒数/个·cm^{-2}	
60	20~30	150~250
70	20~30	300~600
80	30~60	400~700
90	40~50	400~700
95	100~150	400~700

表 2.6-11　品种规格与供应状态

技术标准	品种	供应状态	δ 或 d /mm
YS/T 213—1994 YS/T 215—1994	板材	O H×4 H×8	0.3~10.0 0.3~6.5 0.3~6.0
GB/T 3880—1997	轧制板材	O H14、H24、H18 F、H112	>0.2~10.0 >0.2~4.5 >4.5~150.0

续表 2.6-11

技术标准	品种	供应状态	δ 或 d /mm
GJB 2053—1994	薄板	O、H×4、H×8	0.5～0.8 >0.8～1.5 >1.5～2.0 >2.0～4.0
GJB 2662—1996	厚板	O H112	>4～10 7～50
GB/T 3191—1998	挤压棒材	H112、O、F	5～600
GJB 2054—1994	挤压棒材	H112、O	5～350
HB 5202—1982	挤压棒材	H112、O	≤240
GJB 2057—1995	挤压型材	H112、O	—
GB/T 4436—1995 GB/T 4437—2000	热挤压管	H112	外径≤185， 壁厚 5～32.5
GJB 2381—1995	热挤压管	H112、O	外径 25～250， 壁厚 5～35
GJB 2379—1995	冷拉管	O	外径≤120， 壁厚 1～5
GJB 2379—1995	冷拉管	O、H×8	外径≤120， 壁厚 1.5～5
GJB 2351—1995 HB 5204—1982	自由锻件、 模锻件	H112	按协议
GB/T 3196—2001 GJB 2055—1994	线材	H×8	1.6～10.0

表 2.6-12 技术标准规定的性能

技术标准	品种	试样状态	δ 或 d /mm	σ_b/MPa	δ/%
				≥	
YS/T 213—1994 YS/T 215—1994	板材	O	0.3～3.0	98～147	22①
			>3.0～10.0	98～147	20
		H×4	0.3～6.5	147～216	6①
		H×8	0.3～0.5	186	1①
			>0.5～0.8	186	2
			>0.8～1.2	186	3
			>1.2～6.0	186	4
GB/T 3880—1997	轧制板材	O	>0.2～0.8	100～150	19②
			>0.8～4.5		23
			>4.5～10.0		21
		H14 H24	>0.2～0.8	145～215	6②
			>0.8～1.3		6
			>1.3～4.5		6
		H18	>0.2～0.5	185	1②
			>0.5～0.8		2
			>0.8～1.3		3
			>1.3～4.5		4
		H112	>4.5～10.0	110	16②
			>10.0～12.5	120	16
			>12.5～25.0	120	16③
			>25.0～80.0	110	16

续表 2.6-12

技术标准	品种	试样状态	δ 或 d /mm	σ_b/MPa	δ/%
				≥	
GJB 2053—1994	薄板	O	0.5～0.7	98～147	18①
			>0.7～3.0		22
			>3.0～4.0		20
		H×4	0.5～4.0	147～215	6①
		H×8	0.5～0.8	186	2①
			>0.8～1.2		3
			>1.2～4.0		4
GJB 2662—1996	厚板	O	>4～10	98～147	20①
		H112	7～10	108	15①
			>10～25	118	15
			>25～50	108	12
GB/T 3191—1998	挤压棒材④	H112、O	≤150	≤165	20③
GJB 2054—1994	挤压棒材	H112、O	5～150	≤167	20③
			>150～250	≤167	15③
HB 5202—1982	挤压棒材	H112、O	≤240	≤167	20③
GJB 2507—1995	挤压型材	H112、O	所有	≤167	16
GB/T 4437—2000	管材⑤	H112	所有	≤167	—
GJB 2381—1995	管材⑤	H112、O	25～250	≤167	—
GJB 2379—1995	冷拉管	O H×8	所有 所有	≤137 137	— —
GJB 2351—1995 HB 5204—1982	自由锻件、 模锻件	H112	按协议	≤167	20③
GB/T 3196—2001 GJB 2055—1994	线材	H×8	1.6～10.0	τ = 69	—

①为 δ_{10} 数据。②标距为 50 mm 数据。③为 δ_5 数据。④直径 $d > 150$ mm 的棒材，其力学性能附报告单。⑤壁厚 $\delta < 5$ mm 的管材，室温纵向力学性能由供需双方另行协商或附试验结果；外径 d185～300 mm，壁厚 $\delta > 32.5$ mm 的管材，室温纵向力学性能由供需双方另行协商。

表 2.6-13 不同温度的力学性能

温度/℃	状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%
−78	H18	160	120	34
25	O	115	40	40
	H14	150	130	16
150	O	80	35	47
	H14	125	105	17
200	O	55	30	50
	H14	100	65	22
260	O	40	25	60
	H14	75	35	25
315	O	30	20	60
	H14	40	20	40
370	O	20	15	60
	H14	20	15	60

编写：张新明（中南大学）
林 林（中南大学）
审稿：唐仁政（中南大学）

第 7 章　4×××系铝合金

1　概述

4×××系铝合金的主要合金元素是硅，硅在铝中的加入量为 1%～13%，Al-Si 是共晶型合金，共晶温度 577℃，共晶合金成分为 11.7%Si。Al 在 Si 中几乎不溶解，Si 在 Al 中最大溶解度（577℃时）为 1.65%，室温下溶解度仅为 0.05%左右。因此，合金中的 Si 可以认为是以纯硅形式存在。Al-Si 二元合金是不能热处理强化的。

该系合金的特点是熔点低，流动性好，容易补缩，可避免焊接裂纹。韧性和抗蚀性也好，对焊接十分有利，因而 Al-Si 合金可作为焊接铝用的焊丝和钎料。

为了提高 Al-Si 合金强度，多数是加 Cu 和 Mg，使其变成可热处理强化的铝合金，适用于焊接可热处理强化的铝合金。有的 Al-Si 合金还加少量 Ni，与 Fe 形成金属间化合物，提高 Al-Si 合金高温强度和硬度，而又有低线胀系数和高的耐磨性，如 4032 合金，适于制造活塞及在高温下工作的零件。

4×××系铝合金中含 Si 量超过 3%时，应进行变质处理（参见本篇第 12 章）

4×××系铝合金阳极氧化时，呈深灰色乃至炭黑色，适应于建筑行业。

国际注册的 Al-Si 系变形铝合金有近 30 个牌号，我国国家标化中有 10 个牌号。关于 4×××系铝合金的牌号及成分见本篇第 1 章表 2.1-15。

2　合金各论

2.1　4032（4A11）合金

2.1.1　成分和组织

4032 合金含硅量为 11.0%～13.5%，还有 Cu、Mg 和 Ni 等。铸造性能好，线胀系数小，耐磨性好；同时因含铁和镍量较高，故亦具有较好的耐热性，可认为是耐热锻铝。该合金抗应力腐蚀开裂能力较好，但一般抗蚀性能和焊接性能较差。合金主要相组成物为α(Al)、Si、Mg_2Si、$CuAl_2$、S(Al_2CuMg)、Al_2Cu_2Fe，或 AlCuNi。杂质相为 $FeAl_3$、AlFeSi 等。4032 合金详细成分见本篇第 1 章表 2.1-15。

镁、硅、铜生成强化相 Mg_2Si、$CuAl_2$ 和 S 相。单质硅相能改善铸造性能，耐磨。铁、镍相能提高高温性能。铬、钛细化晶粒，同时改善合金气密性。

2.1.2　物理性能（表 2.7-1）

表 2.7-1　4032 合金的物理性能①

密度 /g·cm^{-3}	液相线温度 /℃	共晶温度 /℃	初熔温度 /℃	线胀系数 /K^{-1}	比热容 /J·(kg·K)$^{-1}$	热导率/W·(m·K)$^{-1}$		电阻率/nΩ·m		电导率/%IASC	
						O	T6	O	T6	O	T6
2.68	571	532	532	56×10^{-6}	864	55	141	43.1	47.9	40	36

① 表中未特别注明，均指 20℃下物理性能。

2.1.3　力学性能

1）不同温度下的力学性能见表 2.7-2。

表 2.7-2　4032-T6 合金在不同温度下的典型力学性能

温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
-200	460	337	11
-100	415	325	10
-30	385	315	9
25	380	315	9
100	345	300	9
200	90	62	30
300	33	24	70
400	21	12	90

2）T6 状态下的力学性能见表 2.7-3。

表 2.7-3　4032 合金 T6 状态下的力学性能

抗拉强度①/MPa	屈服强度/MPa	硬度 HB	抗剪强度/MPa	疲劳强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
379	317	120	262	110	79	0.33

① 拉伸试样标距为 50 mm。

3）疲劳强度见表 2.7-4。

4）蠕变-断裂性能见表 2.7-5。

2.1.4　工艺参数

1）退火工艺　415℃保温 2～3 h，然后以小于冷却速度 25℃/h 炉冷至 260℃。

表 2.7-4　4032-T6 合金在不同温度下的疲劳强度①

温度/℃	24	149	204	260
循环次数/次	应力/MPa			
10^4	359	—	—	—
10^5	262	207	186	131
10^6	207	165	138	83
10^7	165	124	90	55
10^8	124	90	55	34
5×10^8	114	79	48	34

① 基于室温旋转梁试验和高温悬梁试验。

表 2.7-5　4032-T6 合金的蠕变-断裂性能

温度 /℃	受应力时间/h	断裂应力 /MPa	伸长率/%		
			1.0%	0.5%	0.2%
100	0.1	331	283	269	—
	1	317	283	262	—
	10	303	283	262	—
	100	296	276	262	—
	1 000	296	276	255	—
149	0.1	290	276	248	—
	1	276	269	241	—
	10	269	255	234	—
	100	248	241	221	—
	1 000	207	200	186	—

续表 2.7-5

温度/℃	受应力时间/h	断裂应力/MPa	伸长率/%		
			1.0%	0.5%	0.2%
204	0.1	234	228	221	138
	1	214	207	200	131
	10	186	179	165	103
	100	138	131	124	59
	1 000	83	76	69	—

2）固溶处理工艺　505～515℃，保温 4 min，然后水冷淬火；结构复杂或重量较大的锻件在 65～100℃水中淬火。

3）时效工艺　170～175℃，保温 8～12 h。

4）热加工温度　315～480℃。

2.1.5　主要用途

主要半成品为锻件和棒材。典型用途为用作活塞和其他高温工作零部件。

2.2　4043（4A01）合金

2.2.1　成分和组织

4043合金为含硅量5%的变形铝合金，属特殊铝（原LT1），专门用作焊接材料（填充金属）。该合金的特点是，熔点低，流动性好，容易补缩，对避免焊接裂纹十分有利，而且抗蚀性好。广泛用作焊接 Al-Mg-Si 系合金、铸造铝合金、对焊接接头的强度要求不高而可焊性又较差的铝合金。用4A01合金作填充金属，焊缝的塑性和韧性不高，进行阳极化处理时，大多存在焊缝与基体金属颜色不一致的缺点。用4A01 作填加金属焊接 Al-Mg 系合金时，焊缝中析出 Mg_2Si，一般不宜焊接含镁量超过3%的 Al-Mg 合金。4A01 合金本身不可以热处理强化，但可有选择地焊接一些可热处理强化的铝合金，其原因也是形成 Mg_2Si 的缘故。4043 合金的相组成物为 α(Al) 和 Si 相，可能存在的杂质相为 α-（Fe_2SiAl_8）、β-（$FeSiAl_5$）和 $FeAl_3$ 等。硅加入铝中，使合金具有很好的流动性、很小的收缩率和良好的可焊性，因而适合于作填充金属。

4043 合金主要成分（质量分数）为：Si = 4.5%～6.0%，其余成分见本篇第1章表 2.1-15。

2.2.2　物理性能

1）密度（20℃）为 2.6 g/cm³。

2）热学性能　25℃ O状态热导率为 163 W/（m·K）；平均线胀系数（20～100℃）为 $22.0\times10^{-6}\ K^{-1}$。

3）电学性能　20℃时，O 状态下电导率为 50% IACS；电阻率为 41 nΩ·m/K。

2.2.3　力学性能

典型力学性能见表 2.7-6 和表 2.7-7。

表 2.7-6　4043 合金作填充金属（铸态）典型力学性能

σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_{10}/%	τ/MPa	HBS
131	55.2	62	8	97	40

2.2.4　焊接性能

4A01 合金作为专用的焊接填加金属，主要优点在于其熔点低，流动性好，当基体金属冷却后，它仍然保持塑性，能释放产生裂纹的收缩力。但它并非适用所有铝合金，应考虑与基体金属互相稀释后，合金元素之间的作用对性能带来的影响。与基体金属的配合详见表 2.7-8。

表 2.7-7　4043 铝合金焊丝的典型拉伸性能

焊丝直径/mm	状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
5.0	H16	205	180	1.7
3.2	H14	170	165	1.3
1.6	H18	285	270	0.5
1.2	H16	200	185	0.4
5.0	O	130	50	25
3.2	O	115	55	31
1.6	O	145	65	22
1.2	O	110	55	29

表 2.7-8　推荐焊接铝合金时基体金属与填充金属的配合

基体金属牌号	配合的填充金属牌号				
	要求强度	要求韧性	要求阳极化处理后颜色一致	要求抗海水腐蚀	要求最小裂纹倾向
1100	4A01（4043）	1100	1100	1100	4043
2219	2319	2319	2319	2319	2319
6061	5356	5356	5654	4043	4043
6063	5356	5356	5356	4043	4043
3A21（3003）	4043	1100	1100	1100	4043
5A02（5052）	5356	5654	5356	5554	4043
5086	5356	5356	5356	5356	5356
5083	5183	5356	5183	5183	5356
5454	5356	5554	5554	5554	5356
5A05（5456）	5A30（5556）	5356	5556	5556	5356
7A05（7005）	5039	5356	5036	5039	5356
7A31	5039	5356	5036	5039	5356

2.2.5　抗蚀性

一般抗蚀性良好，抗应力腐蚀开裂能力强，抗海水腐蚀。

2.2.6　工艺参数

熔炼温度 690～720℃，铸造温度 670～690℃。热加工温度 400～450℃。

2.2.7　主要用途

产品为线材，用作铝合金焊接填充金属。

2.3　4343（4A13）合金

2.3.1　成分和组织

4343 合金是铝合金的一种焊接填充合金，名义成分为 Al-7.5%Si，含硅量比 4A01 高。熔点低，凝固范围窄，流动性好，有利于焊缝凝固时的补缩和减小裂纹倾向，用作复合钎焊板包覆层，亦可单独作钎接焊料。其相组成物主要为 α-（Fe_2SiAl_8）、β-（$FeSiAl_5$）、$FeAl_3$、（FeMn）Al_6 等。详细成分见本篇第1章表 2.1-15。

2.3.2　物理性能

1）密度（20℃）为 2.60 g/cm³。

2）热学性能　比热容 880 J/（kg·K）；热导率（25℃）180 W/（m·K）；平均线胀系数（20～100℃）为 $21.6\times10^{-6}\ K^{-1}$。

3）电学性能　所有状态下 20℃时电导率为 47% IACS；

电阻率为 37 nΩ·m。

2.3.3 耐蚀性

一般抗蚀性良好，有抗海水腐蚀特点，抗应力腐蚀开裂能力强。

2.3.4 工艺参数

熔炼温度 700～720℃，铸造温度 680～700℃。热加工温度 430～480℃。

2.3.5 主要用途

主要半成品为板材，用作 LQ2 钎接合金板的包覆层。LQ2 基体合金为 3A21，包覆层为 4A13，包覆层厚度 0.07～0.16 mm。LQ2 以 O 或 H×4 状态供应。4A13 合金也可单独作钎焊填充金属。

2.4 4047（4A17）合金

2.4.1 成分和组织

4047 合金熔点低，流动性特别好，易于焊接补缩，释放收缩应力。合金本身凝固收缩性小，致使焊缝裂纹敏感小。4A17 合金热处理不可强化，由于它作为填充金属时裂纹敏感性小，亦可作为某些热处理可强化合金的填料。视基体金属的具体情况，熔合后由于扩散作用往往可使焊接具有可热处理强化特点，但焊缝韧性不高。4047 含硅量高，呈灰色，阳极氧化呈暗灰色，难与基体材料保持颜色一致性，但有较好的抗海水腐蚀能力。详细成分见本篇第 1 章表 2.1-15。

2.4.2 主要用途

4047 合金是一种铝合金钎焊料。

4047 主要作为一号钎焊铝 LQ1 的包覆层。LQ1 系由心板 3A21 和包覆层 4A17 复合而成，板厚 0.8～2.20 mm，双面包覆，包覆层厚度为 0.07～0.16 mm。4047 合金亦可单独作为钎焊填充金属、裸露焊条和电极。

编写：陈康华（中南大学）
罗丰华（中南大学）
审稿：唐仁政（中南大学）

第8章 5×××系铝合金

1 概述

5×××系铝合金是以Mg为主要添加元素的铝合金，由于它抗蚀性好，又称防锈铝合金。

Mg在Al中的溶解度大，450℃为17.4%，室温尚有1%，在理论上讲Al-Mg合金应该有强烈的时效硬化效果，但因Al-Mg化合物β（Mg_2Al_3）相的沿晶沉淀倾向和弥散度的限制，无实用价值，时效硬化很少重视，多以退火或冷加工硬化状态应用。

工业用Al-Mg合金成分变化较大，变形Al-Mg合金含Mg量可由2.0%增加到10%。随着含Mg量的增加，塑性和抗蚀性明显下降，特别是含Mg量大于7%的合金，工艺性能显著变坏。

在Al-Mg合金中加Mn或Cr，能改善抗蚀性和可焊性，还能起一定的强化作用。加Ti和V是细化晶粒，提高强度和可焊性。加Be能防止熔体和焊接时的氧化倾向。如果高Mg合金中存在“钠脆”现象，可加少量Sb或Bi来消除。

Al-Mg合金中，Cu、Zn、Fe和Si是杂质，应限制。5A03合金为改善焊接性能，特加入0.5%~0.8%Si。

Al-Mg合金也是应用较广泛的一种合金，密度比纯铝小，抗海水腐蚀，还有良好的可焊性和抛光性能，强度比纯铝和Al-Mn系合金高。5A03和5A05合金为单相组织，可焊接，多以板、带和棒材供应，而5A06、5B05等合金主要做焊丝、铆钉以及管、棒材等挤压制品供应，这些合金的塑性和抗蚀性较差。

应特别注意Al-Mg合金中的β相行为。含Mg量小于3%的合金稳定性高，无论是退火或冷加工硬化状态，在室温或敏化处理（67~177℃）温度下长时间加热，β相不会在晶界处形成β网膜，对应力腐蚀和剥落腐蚀都不敏感。但是含Mg量大于3.5%时，特别是经过冷加工硬化，含Mg量越高应力腐蚀敏感性越低。

Al-Mg系合金国际注册牌号超过70个，我国国家标准中也有30多个牌号。牌号和成分见本篇第1章表2.1-15。

2 合金各论

2.1 5005合金

2.1.1 成分和组织

5005合金的镁含量为0.8%，具有中等强度，耐蚀性能良好。生产的半成品有薄板材、线材、棒材，能用作铰线、铆钉线，能轧制棒材和拉拔成管材。

详细成分见本篇第1章表2.1-15。

主要相组成物为α(Al)和β(Mg_5Al_8)，可能的杂质相为$FeAl_3$。

2.1.2 物理性能

1）密度（20℃）为2.7 g/cm³。

2）热性能　液相线温度为652℃。固相线温度为632℃。平均线胀系数见表2.8-1。体胀系数（20℃）为68×10^{-6} K^{-1}。比热容（20℃）为900 J/（kg·K）。热导率（20℃）为205 W/（m·K）。

3）电性能　O和H38状态，20℃时电导率为52%IACS。O和H38状态，20℃时电阻率为33.2 nΩ·m，电阻温度系数为0.1（nΩ·m）/K。在25℃每升含53 g NaCl和3 g H_2O_2的电解液中，对0.1 mol/L甘汞电极的电位为-0.83 V。

表2.8-1　5005合金不同温度范围的平均线胀系数

温度范围/℃	-50~20	20~100	20~200	20~300
平均线胀系数 /$10^{-6}K^{-1}$	21.9	23.7	24.6	25.6

2.1.3 力学性能

拉伸性能见表2.8-2和表2.8-3。剪切屈服强度约为抗拉强度的55%。压缩屈服强度与拉伸屈服强度相当。泊松比为0.33。拉伸弹性模量为68.2 GPa。切变模量为25.9 GPa，压缩弹性模量为69.5 GPa。硬度见表2.8-4。

表2.8-2　5005合金的典型力学性能

状态	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率① /%	硬度HBS	抗剪强度 /MPa
O	124	41	25	28	76
H12	138	131	10	—	97
H14	159	152	6	—	97
H16	179	172	5	—	103
H18	200	193	4	—	110
H32	138	117	11	36	97
H34	159	138	8	41	97
H36	179	165	6	46	103
H38	200	186	5	51	110

① 厚1.6 mm的薄板试样。

表2.8-3　5005合金薄板和厚板的力学性能范围

状态（厚度/mm）	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率① /%
O	105~145	35	12~22
H12	125~165	95	2~9
H14	145~185	115	1~8
H16	162~205	135	1~3
H18	≥185	—	1~3
H32	120~160	85	3~10
H34	140~180	105	2~8
H36	160~200	125	1~4
H38	≥180	—	1~4
H112（6.35~12.50）	≥115	—	8
H112（12.50~40.64）	≥105	—	10
H112（40.64~81.28）	≥100	—	16

① 标长50 mm或4d，d为试样直径。伸长率最小值取决于轧制品的厚度。

表2.8-4　5005合金不同状态下的硬度

状态	O	H32	H34	H36	H38
硬度HBS	28	36	41	46	51

2.1.4 工艺参数

熔炼温度700~750℃，铸造温度710~730℃。退火温度345℃，不需要保温。热加工温度260~510℃。

2.1.5 主要用途

主要用于导线、炊具、仪表和建筑方面。阳极氧化时，5005合金的表面膜比较清晰，比3003合金的表面膜光亮，能和建筑用的6063合金挤压件很好地配色。

2.2 5050合金

2.2.1 成分和组织

该合金含镁量为1.4%，是一种可加工硬化合金，具有良好的焊接性能，在海洋空气中具有良好的抗蚀性。其半成品有薄板材、厚板材、管材（含拉拔无缝管、焊管等）、棒材、异型材和线材。

详细成分见本篇第1章表2.1-15。

主要相组成物为α(Al)、β(Mg_5Al_8)，可能的杂质相有$FeAl_3$等。

2.2.2 5050合金的物理性能

1）密度（20℃）为2.69 g/cm³。

2）热性能 平均线胀系数见表2.8-5。比热容（20℃）为900 J/（kg·K）。热导率（20℃）191 W/（m·K）。

表2.8-5 5050合金不同温度范围下的平均线胀系数

温度范围/℃	-50~20	20~100	20~200	20~300
平均线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$	21.8	23.8	24.7	25.6

3）电性能 O和H38状态下，20℃时电导率为50% IACS。O和H38状态下，20℃时电阻率为34 nΩ·m，电阻温度系数为0.1 nΩ·m/K。在25℃每升含53 g NaCl和3 g H_2O_2的电解液中，对0.1 mol/L甘汞电极的电位为-0.83 V。

2.2.3 力学性能

5050合金的典型力学性能见表2.8-6；拉伸性能见表2.8-7和表2.8-8。5050合金的抗剪屈服强度为抗拉屈服强度的55%，抗压屈服强度与抗拉屈服强度相当。弹性模量为68.9 GPa，切变模量为25.9 GPa。泊松比为0.33。不同状态下硬度见表2.8-9。

表2.8-6 5050合金的典型力学性能

状态	抗拉强度①/MPa	屈服强度①/MPa	伸长率①②/%	硬度HBS	抗剪强度/MPa	疲劳强度③/MPa
O	145	55	24	36	105	83
H32	170	145	9	46	115	90
H34	190	165	8	53	123	90
H36	205	180	7	58	130	97
H38	220	200	6	63	138	97

① 低温强度及伸长率与室温的相等或高一些。
② 1.6 mm厚的薄板样品。
③ 5×10^8次循环，R.R.Moore的型式试验。

表2.8-7 5050合金不同温度下的拉伸性能

状态	温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度①/MPa
O	-196	255	70
	-80	150	60
	-28	145	55
	24	145	55
	100	145	55
	149	130	55
	204	95	50
	260	60	41
	316	41	29
	371	27	18
H34	-196	305	205
	-80	205	170
	-28	195	165
	24	195	165
	100	195	165
	149	170	150
	204	95	50
	260	60	41
	316	41	29
	371	27	18
H38	-196	315	250
	-80	235	205
	-28	220	200
	24	220	200
	100	215	200
	219	185	170
	204	95	50
	260	60	41
	316	41	29
	371	27	18

① 试样在无负荷情况下在实验温度保温10 000 h后测定的最低强度。测定时先以35 MPa/min的速度施加应力，试样屈服后，再以5%/min的应变的速度拉伸，直至断裂；结果偏差2%。

表2.8-8 5050合金的拉伸性能最小值

状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率①/%
O	125	41	16~20
H32	150	110	4~6
H34	170	138	3~5
H36	185	151	2~4
H38	200		2~4

① 最低伸长率决定于材料厚度。

表2.8-9 5050合金不同状态下的硬度

状态	O	H32	H34	H36	H38
HBS	36	46	53	58	63

2.2.4 工艺参数

熔炼温度700~750℃，铸造温度710~730℃。退火温度345℃，不需要在此温度下保持。热加工温度260~510℃。

2.2.5 主要用途

可做成厚板，管、棒、异型材及线材使用，更多的是以薄板作为制冷机的内衬板，管材作为汽车的气、油导管，焊接管材作为灌溉管道。

2.3 5052（5A02）合金

2.3.1 成分和组织

5052合金的镁含量为2.5%，在铝-镁系防锈铝中属含镁量较低者。其特点是：冷作硬化后具有中等强度，抗疲劳强

度高，耐蚀性能好，热处理不可强化。具有良好的低温性能，随着温高的降低，抗拉强度、屈服强度、伸长率均有提高，低温韧性亦好。退火状态塑性好，加工硬化率高，硬状态塑性低。冷变形度为50%时，再结晶温度约为288℃。可焊性良好，但焊接裂纹敏感系数大。

详细成分见本篇第1章表2.1-15。

主要组成物为α(Al)、$\beta(Mg_5Al_8)$、$MnAl_6$(或$CrAl_7$)；可能的杂质相为Mg_2Si、$FeAl_3$、$(FeMn)Al_6$等。Fe和Si为主要杂质，应加以控制。

2.3.2 物理性能

1) 密度（20℃）为2.68 g/cm³。

2) 热性能　平均线胀系数见表2.8-10。体胀系数（20℃）为69×10^{-6} K^{-1}。

表2.8-10　5052合金不同温度范围下的平均线胀系数

温度范围/℃	-50~20	20~100	20~200	20~300
平均线胀系数 /$10^{-6}K^{-1}$	22.1	23.8	24.8	25.7

3) 电性能　20℃时O和H38状态下电导率为35%IACS。20℃时O和H38状态下电阻率为49.3 nΩ·m，电阻温度系数为0.1 nΩ·m/K。在25℃每升含53 g NaCl和3 g H_2O_2的电解液中，对0.1 mol/L甘汞电极的电位为-0.85 V。

2.3.3 力学性能

5052合金的典型力学性能见表2.8-11，拉伸性能与温度的关系见表2.8-12，不同状态下的硬度值见表2.8-13。抗剪屈服强度约为抗拉屈服强度的55%，压缩屈服强度与抗拉屈服强度基本相同。泊松比为0.33。拉伸弹性模量为69.3 GPa，切变模量为25.9 GPa，压缩弹性模量为70.7 GPa。

表2.8-11　5052合金的典型力学性能

状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%		硬度HBS	抗剪强度/MPa	疲劳强度①/MPa
			厚度1.6 mm	直径12.5 mm			
O	195	90	25	27	47	125	110
H32	230	195	12	16	60	140	115
H34	260	215	10	12	68	145	125
H36	275	240	8	9	73	160	130
H38	290	255	7	7	77	165	140

① 循环5×10^8次，R.R.Moore型式试验。

表2.8-12　不同温度下5052合金的典型拉伸性能

状态	温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度①/MPa	伸长率/%
O	-196	303	110	46
	-80	200	90	35
	-28	193	90	32
	24	193	90	30
	100	193	90	36
	149	159	90	50
	204	117	76	60
	260	83	52	80
	316	52	38	110
	371	34	31	130
H34	-196	379	248	28
	-80	276	221	21
	-28	262	214	18
	24	262	214	16
	100	262	214	18
	149	207	186	27
	204	165	103	45
	260	83	52	80
	316	52	38	110
	371	34	21	130
H38	-196	414	303	25
	-80	303	262	18
	-28	290	255	15
	24	290	255	14
	100	276	248	16
	149	234	193	24

① 试样在无负荷情况下在实验温度保温1 000 h后测定的最低强度。测定时先以35 MPa/min的速度施加应力，试样屈服后，再以5%/min的应变速度拉伸，直至断裂；结果偏差2%。

表2.8-13　5052合金不同状态的硬度

状态	O	H32	H34	H36	H38
HBS	47	60	68	73	77

2.3.4 工艺参数

熔炼温度700~750℃，铸造温度715~730℃。退火温度345℃，不需要保温。热加工温度260~510℃。

2.3.5 主要用途

主要用于制造飞机的燃料和燃油管及燃料箱、各种船舶和运输工具中的零部件、薄板金属制品、仪表、街灯支架、铆钉和线材等。该合金适用于要求有优良加工性能、优良耐蚀性能、高疲劳强度、高可焊性和中等静态强度的工况条件下结构材料。该合金可以加工成各种规格的板、带、箔、管、棒、线、型材，还可用作化工设备、金属板配件、焊条等。

2.4 5056合金

2.4.1 成分和组织

5056合金名义成分为含5%Mg的防锈铝合金，不可热处理强化。退火状态的抗拉强度约为290 MPa，伸长率为32%。冷作硬化后抗拉强度可达1 000 MPa，冷、热加工性能良好，焊接性能优良，耐腐蚀，且能通过包铝或阳极氧化进一步提高其抗蚀性。

详细成分见本篇第1章表2.1-15。

主要相组成物为α(Al)、$\beta(Mg_5Al_8)$，可能的杂质相为Mg_2Si、$FeAl_3$、$(FeMn)Al_6$等。

2.4.2 物理性能

1) 密度（20℃）为2.64 g/cm³。

2) 热性能　平均线胀系数见表2.8-14。体胀系数（20℃）为70×10^{-6} K^{-1}。比热容（20℃）为904 J/(kg·K)。

热导率：20℃时，O状态下为120 W/（m·K)；H38状态下为112 W/（m·K)。

表2.8-14 O状态下5056合金不同温度范围的平均线胀系数

温度范围/℃	-50~20	20~100	20~200	20~300
平均线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$	22.5	24.1	25.2	26.1

3）电性能 电导率：20℃，O状态为29%IACS；H38状态为27%IACS。电阻率：20℃，O状态为59 nΩ·m；H38状态为64 nΩ·m。电阻温度系数：O和H38状态为0.1 nΩ·m/K。在25℃每升含35 g NaCl和3 g H_2O_2的电解液中，对0.1 mol/L甘汞电极的电位为-0.7 V。

2.4.3 力学性能

5056的典型力学性能，不同温度下长时间保温的拉伸性能以及各种状态下的抗拉强度极限分别见表2.8-15、表2.8-16和表2.8-17。抗剪屈服强度约为抗拉屈服强度的55%，抗压屈服强度约与抗拉屈服强度相同。泊松比为0.33。拉伸弹性模量71.7 GPa；切变模量25.9 GPa；压缩弹性模量73.1 GPa。

表2.8-15 5056合金的典型力学性能

状态	抗拉强度③/MPa	屈服强度/MPa	伸长率①/%	硬度HBS	抗剪强度/MPa	疲劳强度②/MPa
O	290	152	35	65	179	138
H18	434	407	10	105	234	152
H38	414	345	15	100	221	152

① 圆形样品；直径12.5 mm。
② 循环5×10^8次，R.R.Moore型式试验。
③ 低温下温度和伸长率不变或有所提高。

表2.8-16 不同温度下5056合金的拉伸性能

状态	温度/℃	抗拉强度①/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
O	24	290	150	35
	149	214	117	55
	204	152	90	65
	260	110	69	80
	316	76	48	100
	317	41	28	130
H38	24	414	345	15
	149	262	214	30
	204	179	124	50
	260	110	69	80
	316	76	48	100
	317	41	28	130

① 试样在无载荷情况下在实验温度保温1 000 h后测定的最低强度。测定时先以35 MPa/min的速度施加应力，试样屈服后，再以5%/min的应变速度拉伸，直至断裂。

2.4.4 工艺参数

熔炼温度700~750℃，铸造温度710~720℃。退火温度415℃，不需要在此温度下保持。热加工温度315~480℃。稳定化退火温度120~150℃。

2.4.5 主要用途

主要半成品包铝或不包铝的线材、棒材。根据使用要求，有稳定化退火和不进行稳定化退火的产品，亦可生产箔材。该合金含镁量较高，主要用于镁合金铆钉、拉链、钉子、筛网和电缆护套等。

表2.8-17 合金5056轧制或冷轧线材、棒材的力学性能极限

合金名称	状态	最小抗拉强度/MPa
未包铝5056	O	315（最大值）
	H111	305
	H12	315
	H32	305
	H14	360
	H34	345
	H18	400
	H38	380
	H192	415
	H392	400
包铝5056	H192	360
	H392	345
	H393	370①

① 最小屈服强度为325 MPa。

2.5 5083合金

2.5.1 成分和组织

5083合金为中等强度铝合金，系Al-Mg系列防锈铝中的典型合金。其特点是具有优良的耐蚀性能和可焊接性能，良好的加工性和低温性能，低温韧性也十分良好。不可热处理强化。为防止“时效软化”和稳定抗蚀性，半成品需进行稳定化退火。为弥补重复退火时屈服强度的降低，最终冷变形量应在50%以上。

详细成分见本篇第1章表2.1-15。

室温时主要相组成物为α(Al)、β(Mg_5Al_8)、$MnAl_6$、$CrAl_7$。可能的杂质相有Mg_2Si、$FeAl_3$、$TiAl_3$、(Fe、Mn)Al_6等。

2.5.2 物理性能

1）密度（20℃）为2.66 g/cm³。

2）热性能 平均线胀系数见表2.8-18。体胀系数(20℃）为70×10^{-6} K^{-1}。比热容（20℃）为900 J/（kg·K)。热导率（20℃）为120 W/（m·K)。

表2.8-18 5083合金不同温度范围的平均线胀系数

温度范围/℃	-50~20	20~100	20~200	20~300
平均线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$	22.3	24.3	25.0	26.0

3）电性能 20℃时各种状态下电导率的平均值为29%IACS。20℃时电阻率为59.5 nΩ·m；电阻温度系数为0.1 nΩ·m/K。在25℃每升含52 g NaCl和3 g H_2O_2的电解液中，对0.1 mol/L甘汞电极的电位为-0.91 V。

2.5.3 力学性能

拉伸性能见表2.8-19、表2.8-20和表2.8-21。O状态下抗剪强度为172 MPa。抗剪屈服强度约为抗拉屈服强度的55%，抗压屈服强度与抗拉屈服强度相同。拉伸弹性模量70.3 GPa；切变模量26.4 GPa；压缩弹性模量71.7 GPa。H321和H116状

态下疲劳强度为 160 MPa（循环 5×10^8 次 R.R.Moore 型试验）。

表 2.8-19　5083 合金的典型拉伸性能

状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率①/%
O	290	145	22
H112	303	193	16
H116	317	228	16
H321	317	228	16
H323，H32	324	248	10
H343，H34	345	283	9

①　试样厚 1.6 mm。

表 2.8-20　5083 合金的力学性能

状态	厚度/mm	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率①/%
O	1.30～38.1	275～350	125～200	16
	38.1～76.2	270～345	115～200	16
	76.2～127	≥260	≥110	14～16
	127～177.8	≥255	≥105	14
	117.8～203.2	≥250	≥95	12
H112	6.35～38.1	≥275	≥125	12
	38.1～76.2	≥270	≥115	12
H116	1.6～38.1	≥305	≥215	12
	38.1～76.2	≥285	≥200	12
H321	4.78～38.1	305～385	215～295	12
	38.1～76.2	285～385	200～295	12
H323	—	310	235～305	8～10
H343	—	345～405	270～340	6～8

①　标距长为 50 mm 或 $4d$，d 为圆柱试样直径；伸长率的最小值与轧制产品的厚度有关。

表 2.8-21　O 状态下 5083 合金在不同温度下的拉伸性能①

温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
-195	405	165	36
-80	295	145	30
-30	290	145	27
25	290	145	25
100	275	145	36
150	215	130	50
205	150	115	60
260	115	75	80
315	75	50	110
370	41	29	130

①　试样在无载荷时在实验温度保温 10 000 h 后测得的最低性能。测定时先施加应力的速度为 35 MPa/min，屈服后以 10%/min 的应变速度使其断裂。

2.5.4　工艺参数

熔体温度 700～750℃，铸造温度 710～720℃。退火温度 415℃，不需要在此温度下保持。热加工温度 315～480℃。

2.5.5　主要用途

主要半成品为板材和棒材，也可加工成管材和锻件。

主要用作飞机和导弹零件、钻探设备、运输设备、甲板、电视塔、小船船壳、远洋轮上层结构、自动卸货车和卡车车身、不氧化焊接压力容器、防火压力缸、低温贮存缸、低温实验站设备等。

2.6　5086 合金

2.6.1　成分和组织

5086 合金系中强铝合金，具有较好的耐蚀和可焊接性。

详细成分见本篇第 1 章表 2.1-15。

主要相组成物为 α(Al)、β(Mg_5Al_8)、$MnAl_6$ 等；可能的杂质相有 Mg_2Si、$FeAl_3$、$TiAl_3$ 等。

2.6.2　物理性能

1）密度（20℃）为 2.66 g/cm³。

2）热性能　平均线胀系数见表 2.8-22。体胀系数为 69×10^{-6} K^{-1}。比热容（20℃）为 900 J/（kg·K）。热导率（20℃）为 127 W/（m·K）。

表 2.8-22　5086 合金不同的温度范围的平均线胀系数

温度范围/℃	-50～20	20～100	20～200	20～300
平均线胀系数 /$10^{-6}K^{-1}$	22.0	23.8	24.7	25.8

3）电性能　20℃时各种状态合金电导率的平均值为 31%IACS。20℃时各种状态合金电阻率的平均值 56 nΩ·m，电阻温度系数为 0.1 nΩ·m/K。在 25℃每升含 53 g NaCl 和 3 g H_2O_2 的电解液中，对 0.1 mol/L 甘汞电极的电位为 -0.86 V。

2.6.3　力学性能

拉伸性能见表 2.8-23 和表 2.8-24。抗剪强度：O 状态下为 160 MPa；H34 状态下为 185 MPa。抗剪屈服强度约为抗拉屈服强度的 55%，抗压屈服强度与抗拉屈服强度相同。泊松比为 0.33。拉伸弹性模量 71.0 GPa；切变模量 26.4 GPa；压缩弹性模量 72.4 GPa。

表 2.8-23　5058 合金的典型拉伸性能

状态（厚度/mm）	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率①/%
（1）典型性能			
O	≥260	115	22
H32，H116	≥290	205	12
H34	≥325	255	10
H112	≥270	130	14
（2）性能范围			
O(0～50)	240～305	95	15～18
H32(0.5～50)	275～325	195	6～12
H34(0.23～25.4)	305～350	235	4～10
H36(0.15～4.11)	325～370	260	3～6
H38(0.15～0.50)	≥345	285	3
H112(4.7～12.7)	≥250	125	8
H112(12.7～25.4)	≥240	110	10
H112(25.4～50.8)	≥240	95	14
H112(50.8～76.2)	≥235	95	14
H116(1.6～50.8)	≥275	195	8～10

①　标距长为 50 mm 或 $4d$，d 为圆柱试样直径；伸长率的最小值与轧制产品的厚度有关。

表 2.8-24　O状态下5086合金在不同温度下的拉伸性能

温度/℃	抗拉强度[①]/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
-196	379	131	46
-80	269	117	35
-28	262	117	32
24	262	117	30
100	262	117	36
149	200	110	50
204	152	103	60
260	117	76	80
316	76	52	110
371	41	29	130

① 试样在无载荷状态下，在实验温度保温10 000 h后的最低性能。测定开始时施加应力的速度为35 MPa/min，屈服后以5%/min的应变速度使其断裂。

2.6.4 工艺参数

熔炼温度700~750℃，铸造温度690~710℃。退火温度345℃，不需要保温。热加工温度315~480℃。

2.6.5 主要用途

半成品有板材、管材、线材、棒材和型材等。

主要用于制造舰艇、飞机和汽车部件，低温设备、电视塔、钻井装置、运输设备、导弹元件、板等。需要有比较好的耐蚀性和可焊接的中等强度合金时使用。

2.7 5154（5A03）合金

5154合金含镁量为3.1%~3.9%，还含少量铬。5154合金为中等强度防锈铝合金，热处理不能强化。其焊接性能、抗蚀性和冷加工性能良好。

2.7.1 成分和组织

详细成分见本篇第1章表2.1-15。

主要相组成物为α(Al)、β(Mg_5Al_8)、$MnAl_6$ 等；可能的杂质相有 Mg_2Si、$FeAl_3$、$TiAl_3$ 等。

2.7.2 物理性能

1）密度（20℃）为2.66 g/cm³。

2）热性能　平均线胀系数见表2.8-25。体胀系数（20℃）为 69×10^{-6} K^{-1}。比热容（20℃）为900 J/（kg·K）。热导率（20℃）为127 W/（m·K）。

表 2.8-25　5154合金不同温度范围的平均线胀系数

温度范围/℃	-50~20	20~100	20~200	20~300
平均线胀系数 /$10^{-6}K^{-1}$	22.1	23.9	24.9	25.9

3）电性能　20℃各种状态合金电导率的平均值为32% IACS。20℃时各种状态合金电阻率的平均值为53.9 nΩ·m，电阻温度系数为0.1 nΩ·m/K。在25℃每升含53 g NaCl和3 g H_2O_2 的电解液中，对0.1 mol/L甘汞电极的电位为-0.86 V。

2.7.3 力学性能

拉伸性能见表2.8-26。抗拉强度和伸长率在纵向和横向上近似相等。抗剪屈服强度约为压缩屈服强度的55%。抗压屈服强度与抗拉屈服强度相当。泊松比为0.33。拉伸弹性模量69.3 GPa；切变模量25.9 GPa；压缩弹性模量70.7 GPa。硬度见表2.8-27。

2.7.4 工艺参数

熔炼温度700~750℃，铸造温度710~720℃。退火温度345℃，不需要保温。热加工温度260~510℃。

表 2.8-26　5154合金的典型力学性能

状态（厚度/mm）	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率[①]/%	硬度HB	抗剪强度/MPa	疲劳强度/MPa
（1）典型性能						
O	240	117	27	58	152	117
H32	270	207	30	67	152	124
H34	290	228	33	73	165	131
H36	310	248	36	78	179	138
H38	330	269	39	80	193	145
H112	240	117	17	63	—	117
（2）性能范围						
O（0.5~76.2）	205~285	75	12~18	—	—	—
H32（0.5~50.8）	250~295	180	5~12	—	—	—
H34（0.23~25.4）	270~315	200	4~10	—	—	—
H36（0.15~4.12）	290~340	220	3~5	—	—	—
H38（0.15~3.25）	≥310	240	3~5	—	—	—
H112（6.25~12.5）	≥220	125	8	—	—	—
H112（12.5~76.2）	≥205	75	11~15	—	—	—

① 标距长50 mm或4d，d是拉伸试样的直径。最小延伸率随轧制产品的厚度而变化。

表 2.8-27　5154合金在各种状态下的硬度值

状态	O	H32	H34	H36	H38	H112
HBS	58	67	73	78	80	63

2.7.5 主要用途

半成品有板材、线材、棒材、管材和型材。

主要用于焊接结构、储槽、压力容器、船舶构件、运输罐车等。

2.8 5182合金

2.8.1 成分和组织

5182合金为热处理不强化的Al-Mg合金，主要成分（质量分数）为：Mg4.0%~5.0%，Mn0.2%~0.5%，详细成分见本篇第1章表2.1-15。该合金退火状态塑性良好，硬状态塑性低，半硬状态塑性中等，抗腐蚀，可焊接。

主要相组成物为α（Al）、β（Mg_5Al_8）和 $MnAl_6$，还可能有杂质相 $FeAl_3$ 等。

2.8.2 物理性能

1）密度（20℃）为2.65 g/cm³。

2）热性能　平均线胀系数见表2.8-28。体胀系数（20℃）为 70×10^{-6} K^{-1}。比热容（20℃）为904 J/（kg·K）。热导率（20℃）为123 W/（m·K）。

表 2.8-28　5182合金在不同温度范围的平均线胀系数

温度范围/℃	-50~20	20~100	20~200	20~300
平均线胀系数 /$10^{-6}K^{-1}$	22.2	24.1	25.0	26.0

3）电性能　20℃时电导率为31% IACS。20℃时电阻率为55.6 nΩ·m，电阻温度系数为0.1 nΩ·m/K。

2.8.3 力学性能

拉伸性能见表2.8-29。O状态下抗剪强度152 MPa。剪

切屈服强度约为拉伸屈服强度的55%，压缩屈服强度与拉伸屈服强度相当。O状态下硬度58HB。泊松比为0.33。拉伸弹性模量为69.6 GPa，压缩弹性模量为70.9 GPa。O状态下疲劳强度为138 MPa（R.R.Moore型旋转束试验，循环5×10^8次）。

表 2.8-29 5182合金的典型拉伸性能

合金状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率[①]/%
O	276	138	25
H32	317	234	12
H34	338	283	10
H19	421	393	4

① 1.6 mm厚试样。

2.8.4 工艺参数

退火温度345℃。

热加工温度260~510℃。

2.8.5 主要用途

薄板用于容器端面，汽车车体、操纵盘和加强件，托架的零件等。

2.9 5454合金

2.9.1 成分和组织

5454合金为热处理不强化的Al-Mg合金，主要成分（质量分数）为Mg=2.0%~2.8%，加存少量Mn或Cr，用Ti细化晶粒。详细成分见本篇第1章表2.1-15。该合金强度较低，塑性较高，抗蚀性和可焊性较好，适于海洋性气氛中工作。

主要相组成物为α(Al)、β(Mg_3Al)和$MnAl_6$。还有少量$FeAl_6$、Mg_2Si和$TiAl_3$相等。

2.9.2 物理性能

1）密度（20℃）为2.68 g/cm^3。

2）热性能 平均线胀系数见表2.8-30。体胀系数（20℃）为68×10^{-6} K^{-1}。比热容（20℃）为900 J/（kg·K)。热导率（20℃）为134 W/（m·K)。

表 2.8-30 5454合金在不同温度范围的平均线胀系数

温度范围/℃	-50~20	20~100	20~200	20~300
平均线胀系数 /10^{-6}K^{-1}	21.9	23.7	24.6	25.6

3）电性能 20℃时各种状态电导率的平均值为34% IACS。20℃时各种状态电阻率的平均值为51 nΩ·m，电阻温度系数为0.1 nΩ·m/K。在25℃每升含53 g NaCl和3 g H_2O_2的电解液中，对0.1 mol/L甘汞电极的电位为-0.87 V。

2.9.3 力学性能

拉伸性能见表2.8-31和表2.8-32。剪切屈服强度约为拉伸屈服强度的55%，压缩屈服强度大约和拉伸屈服强度相同。拉伸弹性模量为69.6 GPa，压缩弹性模量为71.0 GPa。

2.9.4 工艺参数

熔炼温度700~750℃，铸造温度710~720℃。退火温度345℃，不需要保温。热加工温度260~510℃。

2.9.5 主要用途

加工材有薄板和厚板，挤压线材、棒材、型材和管材，挤压无缝管，冷凝器管，带夹层的整套冷凝器管，焊接管等。主要用途为焊接结构、压力容器、海洋用管等。

表 2.8-31 5454合金的力学性能

状态（厚度/mm）	抗拉伸强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度HB	抗剪强度/MPa
（1）典型性能					
O	250	117	22	62	159
H32	275	207	10	73	165
H34	305	241	10	81	179
H36	340	276	8	—	—
H38	370	310	8	—	159
H111	260	179	14	70	159
H112	250	124	18	62	159
H311	260	179	18	70	
（2）性能范围					
O	215~285	≥85	12~18	—	—
H32	250~305	≥180	5~12	—	—
H34	270~325	≥200	4~10	—	—
H112（6~12.5）	≥220	≥125	8	—	—
H112（13~75）	≥215	≥85	11~15	—	—

表 2.8-32 5454合金在不同温度下的典型拉伸性能

状态	温度/℃	抗拉强度[①]/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
O状态	-196	370	130	39
	-80	255	115	30
	-28	250	115	27
	24	250	115	25
	100	250	115	31
	149	200	110	50
	204	150	105	60
	260	115	75	80
	316	75	50	110
	371	41	29	130
H32状态	-196	405	250	32
	-80	290	215	23
	-28	285	205	20
	24	275	205	18
	100	270	200	20
	149	220	180	37
	204	170	130	45
	260	115	75	80
	316	75	50	110
	371	41	29	130
H34状态	-196	435	285	30
	-80	315	250	21
	-28	305	240	18
	24	305	240	16
	100	295	235	18
	149	235	195	32
	204	180	130	45
	260	115	75	80
	316	75	50	110
	371	41	29	130

① 试样在无负荷状态下在实验温度下暴露10 000 h后测定的最低强度。测定时先以35 MPa/min的速度施加应力至材料屈服，然后以5%/min的应变速度直到断裂。

2.10 5456（5A05）合金

2.10.1 成分和组织

5456合金是Al-Mg合金中含Mg量较高的热处理不强化铝合金，提高强度靠冷加工变形，塑性较低。退火状态塑性较好，半硬状态塑性中等。适于氢原子焊、点焊和气焊，合金抗蚀性好。

主要成分（质量分数）为：Mg = 4.7% ~ 5.5%，Mn = 0.5% ~ 1.0%，还加有少量Cr。详细成分见本篇第1章表2.1-15。

主要相组成物为α(Al)、β(Mg_5Al_8)和$MnAl_6$等，还可能有杂质相Mg_2Si、$FeAl_3$和$TiAl_3$等。

2.10.2 物理性能

1）密度（20℃）为2.66 g/cm³。

2）热性能　平均线胀系数见表2.8-33。体胀系数（20℃）为$69\times10^{-6}K^{-1}$。比热容（20℃）为900 J/（kg·K)。热导率（20℃）为116 W/（m·K)。

表2.8-33　5456合金在不同温度范围的平均线胀系数

温度范围/℃	-50~20	20~100	20~200	20~300
平均线胀系数 /$10^{-6}K^{-1}$	22.1	23.9	24.8	25.9

3）电性能　20℃时电导率（所有状态的平均值）为29%IACS。20℃时电阻率（所有状态的平均值）为59 nΩ·m，电阻温度系数为0.1 nΩ·m/K。在25℃每升含53 g NaCl和3 g H_2O_2的电解液中，对0.1 mol/L甘汞电极的电位为-0.87 V。

2.10.3 力学性能

拉伸性能见表2.8-34。H321、H116状态下抗剪强度为270 MPa。H321、H116状态下硬度为90HBS。拉伸弹性模量为70.3 GPa，压缩弹性模量为71.7 GPa。

2.10.4 工艺参数

熔炼温度700~750℃，铸造温度710~720℃。退火温度343℃，不需要保温。热加工温度260~510℃。

2.10.5 主要用途

加工材料有薄板和厚板，挤压线材、棒材、型材和管材，挤压无缝管材，拉拔无缝管材，装甲厚板，挤压装甲材，锻造装甲材等。主要用途作装甲板、高强度焊接结构、储槽、压力容器、海洋用材。

表2.8-34　5456合金的拉伸性能

状态（厚度/mm）	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	
(1) 典型性能				
O	310	159	24①	
H111	324	228	18①	
H112	310	165	22①	
H321②，H116①	352	255	16①	
(2) 性能范围				
O(1.20~6.30)	290~365	130~205	16④	—⑤
O(6.30~80.00)	285~360	125~205	16	14
O(80.00~120.00)	≥275	≥120	—	12
O(120.00~160.00)	≥270	≥115	—	12
O(160.00~200.00)	≥265	≥105	—	10
H112(6.30~40.00)	≥290	≥130	12	10
H112(40.00~80.00)	≥285	≥125	—	10
H116(1.60~30.00)③⑥	≥315	≥230	10	10
H116(30.00~40.00)③⑥	≥305	≥215	—	10
H116(40.00~80.00)③⑥	≥285	≥200	—	10
H116(80.00~110.00)③⑥	≥275	≥170	—	10
H321(4.00~12.50)	315~405	230~315	12	—
H321(12.50~40.00)	305~385	215~305	—	10
H321(40.00~80.00)	285~385	200~295	—	10
H323(1.20~6.30)	330~400	250~315	6~8	—
H343(1.20~6.30)	365~435	285~350	6~8	—

① 12.5 mm直径的圆试样。
② 这种状态的材料不推荐用于暴露在海水中的场合。
③ H116的规定也适用于以前特指的H117的情况。
④ 此列为标距长50 mm，适用于12.5 mm。
⑤ 此列为标距长4*d*（*d*为圆试样直径），适用于厚度超过12.5 mm的材料。
⑥ 这种状态的材料要求通过由买方实施的剥离腐蚀试验。

编写：陈康华（中南大学）
罗丰华（中南大学）
审稿：唐仁政（中南大学）

第9章 6×××系铝合金

1 概述

6×××系铝合金是以镁和硅为主要合金元素的铝-镁-硅系合金，若含有一定量的锰与铬，可以中和铁的有害作用；有时还添加少量的铜，以提高合金的强度，而又不使其抗蚀性有明显降低。导电材料中有少量的铜，可抵销钛及钒对导电性的不良影响。锆或钛能细化晶粒和控制再结晶组织。

Mg_2Si 相是铝-镁-硅系合金的主要强化相。Mg_2Si 相在铝中的最大溶解度为 1.85%，500℃时为 1.05%，300℃时仅有 0.27%。因此，合金可进行热处理强化。Mg_2Si 相的镁、硅含量比为 1.73:1，如果镁过剩，Mg_2Si 相在铝中的溶解度显著减少，使强化效果降低。从强化效果考虑，合金中的硅含量应过剩些。如果合金中含有相当的 Cu 和 Si，则除了 Mg_2Si 相外，还可能形成 $Cu_2Mg_8Si_6Al_5$，即有一部分 Mg_2Si 为 $Cu_2Mg_8Si_6Al_5$ 相取代，后者有一定的自然时效能力。在无锰及铬的该系合金中，铁以 $FeAl_3$、$FeAl_6$、Fe_2SiAl_8 等形式存在。在含有锰与铬时，铁与之形成化合物。

6×××系合金工艺性能良好，能铸成大规格铸锭。该系合金退火状态、新淬火状态和自然时效状态都有很高的塑性，因此可以进行模锻、拉伸、深冲和各种变形程度很大的加工，可生产大型、几何形状复杂的产品。

铝-镁-硅系合金可进行自然时效或人工时效。合金在淬火自然时效状态下塑性和耐蚀性高，但强化效果不如人工时效。由于自然时效速率较慢，自然时效时间不应少于 240 h。铝-镁-硅系合金有“停放效应”，淬火后必须立即进行人工时效才能得到最高的强度。人工时效状态和新淬火状态的抗拉强度随硅含量的增加而增高，然后直到硅增至 2%时，强度不再变化或稍有降低。合金中的 Mg_2Si 相愈少，过剩硅对合金的强度、淬火效果、自然时效和人工时效效果提高愈大。当硅含量一定时，在 Al-Mg-Si 合金中，人工时效和自然时效合金的强度随镁含量的增加而增高，但其增加程度比镁一定时硅的增加程度小一些。

铝-镁-硅系合金耐蚀性能良好，无应力腐蚀破裂倾向，在淬火人工时效状态下合金有晶间腐蚀倾向。晶间腐蚀倾向的大小主要取决于合金的化学成分，如果适当提高锰、铬含量，降低剩余硅、Mg_2Si 相、铁及铜的含量，则可提高合金的耐蚀性。

由于6×××系合金耐蚀性能好，可氧化着色，在民用建筑中广泛用作窗框、门框、间壁、升降梯并用于家具、汽车、轻工业等部门。经过特殊的机械热处理后，合金在具有较高强度的同时，可获得很高的导电性能，因此在电气工业方面也得到应用。带有不同颜色表面的合金可用来装饰飞机座舱。此外，还用于飞机发动机零件，如桨叶和形状复杂的锻件等。

该系合金国际注册牌号有 70 余个，我国国家标准中牌号有 15 种。

2 合金各论

2.1 6005 合金

2.1.1 成分和组织

6005 合金属 Al-Mg-Si 系可热处理强化的铝合金，其主要成分（质量分数）为 Mg = 0.4% ~ 0.7%，Si = 0.6% ~ 0.9%。详细成分见本篇第 1 章表 2.1-15。强化相为 Mg_2Si。Mg 和 Si 除形成强化相外，还有剩余 Si 存在。这种合金有优秀的挤压性能和低的淬火敏感性。容易抛光和阳极氧化。

2.1.2 物理性能

1）热性能　热导率（T5 状态）为 167 W·(m·K)$^{-1}$。比热容为 890 J·(kg·K)$^{-1}$。线胀系数（20 ~ 100℃）为 $23.4\times10^{-6}K^{-1}$。

2）密度（20℃）为 2.7/g·cm^{-3}。

3）电性能　电阻率（20℃，T4 状态）为 35 nΩ·m。

4）磁性能　无磁性。

2.1.3 力学性能

室温力学性能见表 2.9-1。泊松比为 0.33。拉伸弹性模量 T1 状态下为 89 GPa，T5 状态下为 69 GPa；切变弹性模量 T1 状态下为 26 GPa，T5 状态下为 26 GPa。

表 2.9-1　力学性能

状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	疲劳强度 /MPa	抗剪强度 /MPa	硬度 HBS
T1	170	105	16	100	105	46
T5	260	240	8	100	205	95

2.1.4 工艺参数

退火温度 425℃，固溶处理温度 547℃。时效温度：轧制产品 160℃，挤压或锻造产品 175℃。

2.1.5 选用实际

该合金以挤压型材与管材形式使用，常用于制作梯子、电视天线等。

2.2 6010 合金

2.2.1 成分和组织

6010 合金为 Al-Mg-Si 系可热处理强化的铝合金，其主要成分（质量分数）为 Mg = 0.4% ~ 0.7%，Si = 0.3% ~ 0.7%。详细成分见本篇第 1 章表 2.1-15。强化相为 Mg_2Si。形成强化相后有微量 Si 剩余。合金有优秀的挤压性能和低的淬火敏感性，挤压后喷水即能淬火。

2.2.2 物理性能

1）热性能　热导率见表 2.9-2。比热容为 897J·(kg·K)$^{-1}$。线胀系数见表 2.9-3，体胀系数（20℃）为 $67\times10^{-6}K^{-1}$。

表 2.9-2　热导率

状态	O	T4	T6	T5
热导率（20℃）/W·(m·K)$^{-1}$	202	151	180	167

表 2.9-3　线胀系数

温度/℃	-50 ~ 20	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	21.5	23.2	24.1	25.1

2）密度（20℃）为 2.70 g·cm^{-3}。

3）电性能　见表 2.9-4 ~ 表 2.9-6。

4）磁性能　无磁性。

表 2.9-4　电阻率

状态	O	T4	T6
电阻率（20℃）/nΩ·m	32.5	44.2	36.7

表 2.9-5　电导率

状态	O	T4	T6
电导率（20℃）/%IACS	53	39	44

表 2.9-6　电阻温度系数

状态	O	T4	T6
电阻温度系数(20℃)/(nΩ·m)·K^{-1}	0.1	0.1	0.1

2.2.3　力学性能

拉伸性能见表 2.9-7。T4 状态 10×10^6 次循环时疲劳强度为 117 MPa。拉伸弹性模量 69 GPa；切变模量 25.4 GPa。泊松比为 0.33。T4 状态硬度 76HR15T。

表 2.9-7　拉伸性能

试样取向	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%
T4 状态			
纵向	296	186	23
横向及 45°方向	290	172	24
T6 状态			
纵向	386	372	12
横向及 45°方向	379	352	12

2.2.4　工艺参数

退火温度 415℃，固溶处理温度 565℃，时效温度 175℃。

2.2.5　主要用途

汽车车身薄板。

2.3　6061 合金

2.3.1　成分和组织

6061 合金为 Al-Mg-Si 系可热处理强化铝合金，其主要成分（质量分数）为 Mg = 0.8% ~ 1.2%，Si = 0.4% ~ 0.8%。详细成分见本篇第 1 章表 2.1-15。合金主要强化相为 Mg_2Si。合金中另外加少量 Cu（0.15% ~ 0.40%）和少量 Cr（0.4% ~ 0.35%）。Cu 可提高强度，为了抵消 Cu 对抗蚀性的不良影响才加入 Cr。该合金在时效后可获得更高强度，但其淬火敏感性高，必须在挤压后固溶处理（不能挤压后直接淬火）和时效。

2.3.2　物理性能

1）热性能　热导率见表 2.9-8。比热容（20℃）为 896 J·(kg·K)$^{-1}$。线胀系数（20 ~ 100℃）为 $23.6\times10^{-6}K^{-1}$。

表 2.9-8　热导率

状　态	O	T4	T6
热导率（20℃）/W·(m·K)$^{-1}$	180	154	167

2）密度（20℃）为 2.7 g·cm^{-3}。

3）电性能见表 2.9-9 和表 2.9-10。

表 2.9-9　电导率

状　态	O	T4	T6
体积电导率/%IACS	47	40	43

表 2.9-10　电阻率

状　态	O	T4	T6
电阻率/nΩ·m	37	43	40

4）磁性能　无磁性。

2.3.3　力学性能

力学性能见表 2.9-11 和表 2.9-12。拉伸弹性模量为 68.3 GPa；压缩弹性模量为 69.7 GPa。

表 2.9-11　典型力学性能

状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%		抗剪强度 /MPa	疲劳强度 $\sigma_{-1}^{①}$ /MPa	硬度 HB
			1.6 mm	ϕ13 mm 棒			
未包铝							
O	124	55	25	30	83	62	30
T4、T451	241	145	22	25	165	97	65
T6、T651	310	276	12	17	207	97	95
包铝							
O	117	48	25	—	76	62	30
T4、T451	228	131	22	—	152	97	65
T6、T651	290	255	12	—	186	97	95

① R.R.Moore 试验，5×10^8 次循环。

表 2.9-12　6061-T6、6061-T651 合金在不同温度下的典型抗拉性能①

温度 /℃	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ /%	温度 /℃	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ /%
−196	414	324	22	149	234	214	20
−80	338	290	18	204	131	103	28
−28	324	283	17	260	51	34	60
24	310	276	17	316	32	19	85
100	290	262	18	371	24	12	95

① 在所示温度无载荷保温 10 000 h，然后以 35 MPa/min 的施载速度试验到屈服强度，再以 5%/min 的应变速率拉伸至断裂。

2.3.4　焊接性能

可焊性良好，可用各种焊接方法焊接。对于厚壁工件建议采用熔化极惰性气体保护电弧焊，钨极氩弧焊适于焊接薄材料。采用 4A01 作填充金属，可减少焊接裂纹，如果基体材料为淬火人工时效状态，焊接后强度会降低约 30%，可通过重新热处理部分恢复其性能，焊缝抗蚀性亦良好。如果要求焊缝阳极化处理后颜色的一致性，应采用 5154 合金作填充金属。

2.3.5　抗蚀性

6061 在大气中的抗蚀性与工业纯铝的相近，也耐淡水和海水腐蚀。在无机酸中的腐蚀速率取决于酸中浓度和温度，但对大多数有机酸是耐蚀的，在氢氧化钾和氢氧化钠溶液中腐蚀严重，而在氢氧化铵溶液中只有轻微的腐蚀。阳极氧化或包铝可进一步提高其抗蚀性。

2.3.6　工艺参数

熔炼温度 720 ~ 750℃，铸造温度 710 ~ 730℃。均匀化退火温度 550℃，热加工温度 350 ~ 500℃。固溶处理温度 525 ~ 530℃。人工时效规范：轧制和拉制产品，160℃，18 h；挤压或锻造产品，175℃，8 h。

2.3.7 主要用途

可加工成板、管、棒、型、线材和锻件。

用作建筑型材，需要良好耐蚀性能的大型结构件，卡车、船舶、铁道车辆结构件，导管，家具等。

2.4 6063合金

2.4.1 成分和组织

6063合金属Al-Mg-Si系可热处理强化铝合金，其主要成分（质量分数）为Mg=0.2%~0.6%，Si=0.45%~0.9%。详细成分见本篇第1章表2.1-15。合金强化相为Mg_2Si，有优秀的挤压性能和低的淬火敏感性，挤压后喷水即可淬火。容易抛光和阳极氧化。

2.4.2 物理性能

1）热性能　热导率见表2.9-13。线胀系数见表2.9-14。比热容为900 J·$(kg·K)^{-1}$。

表2.9-13　热导率

状态	O	T1	T5	T6
热导率(20℃)/W·$(m·K)^{-1}$	218	193	209	201

表2.9-14　线胀系数

温度/℃	-50~200	20~100	20~200	20~300
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	21.8	23.4	24.5	25.6

2）密度（20℃）为2.7 g·cm^{-3}。

3）电性能见表2.9-15和表2.9-16。

表2.9-15　电阻率

状态	O	T1	T5	T6	T83
电导率(20℃)/nΩ·m	30	35	32	33	33

表2.9-16　电导率

状态	O	T1	T5	T6	T83
电导率(20℃)/%IACS	58	50	55	53	53

4）磁性能　无磁性。

2.4.3 力学性能

力学性能见表2.9-17和表2.9-18。泊松比0.33。拉伸弹性模量68.3 GPa；切变模量25.8 GPa；压缩弹性模量69.7 GPa。

表2.9-17　6063合金典型力学性能

状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	硬度 HBS	抗剪强度 τ/MPa	疲劳强度① σ_{-1}/MPa
O	90	48	—	25	69	55
T1	152	90	20	42	97	62
T4	172	90	22	—	—	—
T5	186	145	12	60	117	69
T6	241	214	12	73	152	69
T83	255	241	9	82	152	—
T831	207	186	10	70	124	—
T832	290	269	12	95	186	—

①　R.R.Moore试验，5×10^8次循环。

表2.9-18　6063合金在不同温度下的抗拉性能

温度/℃	抗拉强度① σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%
T1状态			
-196	234	110	44
-80	179	103	36
-28	165	97	34
24	152	90	33
100	152	97	18
149	145	93	20
204	62	45	40
260	31	24	75
316	23	17	80
371	16	14	105
T5状态			
-196	255	165	28
-80	200	152	24
-28	193	152	23
24	186	145	22
100	165	138	18
149	138	124	20
204	62	45	40
316	23	17	80
371	16	14	105
T6状态			
-196	324	248	24
-80	262	228	20
-28	248	221	19
24	241	214	18
100	214	193	15
149	145	133	20
204	62	45	40
260	31	24	75
260	31	24	75
316	23	17	80
371	16	14	105

①　在所示温度无载荷保温10 000 h，然后35 MPa/min的施载速度试验到屈服强度，再5%/min的应变速率拉伸至断裂。

2.4.4 焊接性能

6063合金的焊接性能虽然不及工业纯铝和防锈铝，但在可热处理强化的铝合金中，其可焊性属于上等，可以钎焊、气焊、电阻焊、电弧焊。气焊时一般采用氧乙炔焰和带焊剂的4A01焊条，只能焊接较薄的工件。氩弧焊适用于焊接厚壁大件。

在Al-Mg-Si系合金中，Mg_2Si约1%时，焊接裂纹敏感性最大，6063正好在这一成分范围，如果采用基体材料作填加金属，即使添加细化晶粒的元素也难以焊接，一般采用4A01或Al-Mg系合金作填加金属，裂纹敏感性显著减小，但焊缝强度下降，通过重新热处理，焊缝及周围基体的强度可基本上恢复。用4A01作填充金属的焊缝阳极氧化后色泽比基体的暗淡。作为装饰件，最好采用不用填充料的直接对焊。

2.4.5 抗蚀性

6063合金的一般抗蚀性很高，在大气中使用时，大多数情况下无需涂漆保护。由于该合金阳极氧化性能好，不仅可以使其外表美观，又可提高其抗蚀性，因此6063一般在阳极氧化后使用。退火和淬火状态下耐蚀性最好，自然时效后其抗蚀性与5083、5A05的相当。人工时效后的材料，如果铜和铁的含量较多或过剩硅较多存在，抗蚀性能降低，并会出现晶间腐蚀现象。因为此时会形成α(AlFeSi)和β(AlFeSi)分布于晶界，它们都是有效的阳极相。保证适当的锰和铬含

量，使其与铁化合，消除铁的有害影响，可保证6063良好的抗蚀性。该合金一般表现为点蚀，成分控制不当人工时效后可出现晶间腐蚀，无应力腐蚀开裂倾向是其显著的优点。

2.4.6 工艺参数

熔炼温度720~760℃，铸造温度710~730℃。均匀化退火温度560℃，挤压温度480~500℃。固溶处理温度515~525℃。人工时效160~200℃，10 h，视具体要求而定。

6063的工艺特点是高温塑性好，淬火温度范围宽，临界淬火速度小，可在挤压或锻造脱模后实现喷水或风淬。均匀化退火后宜快速冷却，以保证阳极氧化着色后色泽的均匀性。对于品质好的小直径铸锭，挤压前可以不进行均匀化退火。淬火与人工时效之间的停留时间，不应超过1 h，否则对强度有损害，特别是对屈服强度。6063固溶处理与挤压过程相结合，可以避免晶粒长大。

2.4.7 品种和用途

主要产品为挤压棒材、型材、管材，用作建筑结构材料和装饰材料，如门框、窗框、壁板、货柜、家具、升降梯，以及飞机、船舶、轻工业部门、建筑物等不同颜色的装饰构件。

2.5 6070合金

2.5.1 成分和组织

6070合金为Al-Mg-Si系可热处理强化铝合金，其主要成分（质量分数）为Mg=0.4%~0.7%，Si=1.0%~1.7%。详细成分见本篇第1章表2.1-15。该合金强化相为MgSi。由于有过剩Si存在，Si质点使强度进一步提高。Si易沿晶偏析，降低塑性，故加入少量Mn（0.4%~1.0%），以抵消Si的不利影响。

2.5.2 物理性能

1）热性能 热导率（20℃，T6状态）为172 W·(m·K)$^{-1}$；比热容（20℃）为891 J (kg·K)$^{-1}$。

2）密度（20℃）为2.71 g·cm^{-3}。

3）电性能 电阻率（20℃，T6状态）为39 nΩ·m。

体积电导率（20℃，T6状态）为44 %IACS，电阻温度系数（20℃，T6状态）为0.1 (nΩ·m)·K^{-1}。

4）磁性能 无磁性。

2.5.3 力学性能

力学性能见表2.9-19。

表2.9-19 6070合金的典型力学性能

状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	硬度 HBS	抗剪强度 τ/MPa	疲劳强度 σ_{-1}①/MPa
O	145	69	20	62	97	62
T4	317	172	20	90	206	90
T6	379	352	10	97	234	97

① R.R.Moore试验，5×10^{8}次循环。

2.5.4 焊接性能

焊接性能良好，气焊、氩弧焊、电阻焊均可采用。厚1~25 mm的材料气焊时，应采用氢氧焊炬或氧乙炔焊接，自耗电极电弧焊特别适宜于焊接大件。各种焊接都应采用4A01焊条作填充金属才能保证焊缝抗蚀性不会降低，但热处理后进行焊接时，焊缝附近的强度会降低。

2.5.5 抗蚀性

对于一般腐蚀和应力腐蚀开裂都有很高的抵抗能力，可以无保护地在工业大气和海洋大气中使用。

2.5.6 工艺参数

熔炼温度700~750℃，铸造温度700~740℃。固溶处理温度546~552℃，淬火水温不高于40℃。人工时效规范为160℃，8 h。

6070退火状态成形性能良好，类似于3A21合金。

2.5.7 品种和用途

主要产品为管、棒、线、型材和锻件。

用作大型焊接结构件、桥梁、电视塔、航海用元件、机器零件和导管等。

2.6 6101合金

2.6.1 成分和组织

6101合金为Al-Mg-Si系可热处理强化的铝合金，其主要成分（质量分数）为Mg=0.4%~0.7%，Si=0.3%~0.7%。详细成分见本篇第1章表2.1-15。该合金强化相为Mg_2Si。由于合金元素含量较少，有优秀的挤压性能和低的淬火敏感性。强度比6061和6063合金略低，导电和散热性能较好。

2.6.2 物理性能

1）热性能 热导率（25℃）为218 W·(m·K)$^{-1}$；比热容（20℃）为895 J·(kg·K)$^{-1}$；线胀系数见表2.9-20。

表2.9-20 线胀系数

温度/℃	-50~20	20~100	20~200	20~300
α/10^{-6}K^{-1}	21.7	23.5	24.4	25.4

2）密度（20℃）为2.7 g·cm^{-3}。

3）电性能见表2.9-21~表2.9-23。

表2.9-21 电导率

状态	T61	T63	T64	T65	T6
体积电导率（20℃）/%IACS	59	58	60	58	57

表2.9-22 电阻率

状态	T61	T63	T64	T65	T6	T4
电阻率（20℃）/nΩ·m	29.2	29.7	28.7	29.7	30.2	35

表2.9-23 电阻温度系数

状态	O	T4	T6
电阻温度系数（20℃）/nΩ·m·K^{-1}	0.1	0.1	0.1

4）磁性能 无磁性。

2.6.3 力学性能

力学性能见表2.9-24和表2.9-25。拉伸弹性模量为68.9 GPa，压缩弹性模量为70.3 GPa，抗剪强度为138 GPa，硬度为71HBS。

表2.9-24 6101-T6合金在不同温度下的典型拉伸力学性能

温度/℃	抗拉强度① σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率② δ/%	温度/℃	抗拉强度① σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率② δ/%
-196	296	228	24	149	145	131	20
-80	248	207	20	204	69	48	40
-28	234	200	19	260	33	23	80
24	221	193	19	316	24	16	100
100	193	172	20	371	17	12	100

① 在所示温度无载荷保温10 000 h，然后以35 MPa/min的施载速度试验到屈服强度，再以5%/min的应变速率拉伸至断裂；

② 标距50 mm。

表 2.9-25 6101 合金挤压件的最低力学性能[①]

状态及尺寸	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa
H111	83	55
T6	200	172
T61		
3.0~19.0 mm	138	103
19.5~38.0 mm	124	76
38.1~50 mm	103	55
T63	186	152
T64	103	55
T65	172~221	138~186

① 性能为单一数值的，系最低值。

2.6.4 工艺参数

退火温度 415℃，固溶处理温度 510℃，时效温度 174℃。

2.6.5 主要用途

公共汽车用高强度棒材、电导体与散热器材等。

2.7 6151 合金

2.7.1 成分和组织

6151 合金为 Al-Mg-Si 系热处理可强化铝合金，其主要成分（质量分数）为 Mg = 0.4%~0.7%，Si = 0.6%~0.9%，加有少量 Cr。Mg 和 Si 除形成强化相 Mg_2Si 外，有过剩 Si。Si 成质点增加强度。加 Cr 细化晶粒，抑制固溶处理时发生再结晶。该合金有良好的抗蚀性。详细成分见本篇第 1 章表 2.1-15。

2.7.2 物理性能

1）热性能 热导率见表 2.9-26，比热容（20℃）为 895 J·$(kg·K)^{-1}$，线胀系数见表 2.9-27。

表 2.9-26 热导率

状态	O	T4	T6
热导率（20℃）/W·$(m·K)^{-1}$	205	163	175

表 2.9-27 线胀系数

温度/℃	-50~20	20~100	20~200
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	21.8	23.0	24.1

2）密度（20℃）为 2.71 g·cm^{-3}。

3）电性能见表 2.9-28~表 2.9-30。

表 2.9-28 电导率

状态	O	T4	T6
体积电导率（20℃）/%IACS	54	42	45

表 2.9-29 电阻率

状态	O	T4	T6
电阻率（20℃）/nΩ·m	32	41	38

4）磁性能 无磁性。

2.7.3 力学性能

力学性能见表 2.9-31 和表 2.9-32。

表 2.9-30 电阻温度系数

状态	O	T4	T6
电阻温度系数（20℃）/（nΩ·m）·K^{-1}	0.1	0.1	0.1

表 2.9-31 6151 合金的拉伸性能

状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率[①] δ/%
模锻件 T6			
轴平行晶粒流向	303	225	14(试件)，10(锻件)
轴不平行晶粒流向	303	255	6(锻件)
轧制环 T6、T652			
切向	303	255	5
轴向	303	241	4
径向	290	241	2

① 标距 50 mm 或 4*d*，*d* 为试样工作部分的直径。

表 2.9-32 6151 合金的拉伸性能与温度的关系

温度/℃	抗拉强度[①] σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	温度/℃	抗拉强度[①] σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%
-196	396	345	20	149	195	185	20
-80	345	315	17	204	95	85	30
-28	340	310	17	260	45	34	50
24	330	298	17	316	34	27	43
100	295	275	17	371	28	22	35

① 在所示温度无载荷保温 10 000℃，然后以 35 MPa/min 的施载速度试验到屈服强度，再以 5%/min 的应变速率拉伸至断裂。

2.7.4 工艺参数

1）退火 413℃ ×（2~3）h，以≤27℃/h 的速度炉冷至 260℃。

2）固溶处理 （510~525℃）×4 min，冷水淬火；锻件在 65~100℃热水中淬火。

3）时效 （165~175）℃×（8~12）h。

4）热加工温度 260~480℃。

2.7.5 主要用途

用于模锻曲轴零件、机器零件与生产轧制环，供既要求有良好的可锻性能、高的强度，又要有良好抗蚀性之用。

2.8 6351 合金

2.8.1 成分和组织

6351 合金和 6151 合金主要成分相似，仅 Si 略高 0.1%。另外，不是加 Cr 而是加 Mn。用 Mn 来细化晶粒，抑制固溶处理时发生再结晶。该合金强化相为 Mg_2Si，有过剩 Si 补充强化。用 Mn 来抵消因 Si 沿晶偏析造成的塑性下降。详细成分见本篇第 1 章表 2.1-15。

2.8.2 物理性能

1）热性能 热导率为 213 W·$(m·K)^{-1}$；线胀系数在 20~100℃ 时为 $23.4\times10^{-6}K^{-1}$。

2）密度（20℃）为 2.71 g·cm^{-3}。

3）电性能 电阻率（20℃）为 38 nΩ·m；20℃体积电导率（T6 状态）为 46%IACS。

4）磁性能 无磁性。

2.8.3 力学性能（表 2.9-33）

表 2.9-33 拉伸性能

状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	抗剪强度 τ/MPa	疲劳强度 σ_{-1}/MPa	伸长率 δ/%	硬度 HB
T4	248	152	—	—	20	—
T54	207	138	—	—	10	—
T6	310	283	200	90	14	95

2.8.4 工艺参数

退火温度 350℃，固溶处理温度 505℃，时效温度 170℃。

2.8.5 主要用途

用于公路车辆和铁路车厢的挤压结构，运送水、油和汽油的管件和管子。

2.9 6201 合金

2.9.1 成分和组织

6201 合金为 Al-Mg-Si 系热处理可强化铝合金，其主要成分（质量分数）为 Mg = 0.6% ~ 0.9%，Si = 0.5% ~ 0.9%。Mg_2Si 为强化相。该合金导电性能良好。详细成分见本篇第 1 章表 2.1-15。

2.9.2 物理性能

1）热性能　热导率（T8 状态，25℃）为 205 W·(m·K)$^{-1}$；比热容（20℃）为 895 J·(kg·K)$^{-1}$；线胀系数见表 2.9-34。

表 2.9-34 线胀系数

温度/℃	-50 ~ 200	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	21.6	23.4	24.3	25.2

2）密度（20℃）为 2.69 g·cm^{-3}。

3）电性能　电阻率在 20℃、T4 状态为 37 nΩ·m，20℃、T5 状态为 35nΩ·m；体积电导率在 20℃、T1 状态为 45%IACS，20℃、T5 状态下为 49%IACS。

4）磁性能　无磁性。

2.9.3 力学性能（表 2.9-35）

表 2.9-35 6201 合金典型力学性能

状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ[①] /%
T81	331	310	6
直径 1.6 ~ 3.2，T81	单根 315 min	—	3 min
	平均 330 min	—	3 min
直径 3.21 ~ 4.8，T81	单根 305 min	—	3 min
	平均 315 min	—	3 min

① 试样标距 250 mm。

2.9.4 工艺参数

退火温度 415℃，固溶处理温度 510℃，时效温度 150℃。

2.9.5 主要用途

高强度导电棒材与线材。

2.10 6205 合金

2.10.1 成分和组织

6205 合金为 Al-Mg-Si 系热处理强化的铝合金，主要成分（质量分数）为 Mg = 0.4% ~ 0.6%，Si = 0.6% ~ 0.9%。强化相为 Mg_2Si。详细成分见本篇第 1 章表 2.1-15。该合金具有挤压性能好，韧性优良，强度高等优点。

2.10.2 物理性能

1）热性能　热导率：T1 状态、25℃为 172W·(m·K)$^{-1}$，T5 状态、25℃为 188W·(m·K)$^{-1}$；比热容（20℃）为 895 J·(kg·K)$^{-1}$；线胀系数（20 ~ 100℃）为 23.0 × 10^{-6}℃$^{-1}$。

2）密度（20℃）为 2.7 g·cm^{-3}。

3）电性能　电阻率：T1 状态、20℃为 37 nΩ·m；T5 状态、20℃为 35 nΩ·m。体积电导率：T1 状态、20℃为 45%IACS；T5 状态、20℃为 49%IACS。

4）磁性能　无磁性。

2.10.3 力学性能（表 2.9-36）

表 2.9-36 典型力学性能

状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	抗剪强度 τ/MPa	疲劳强度[①] σ_{-1}/MPa	伸长率 δ/%	硬度 HB
T1	262	138	—	—	19	65
T5	310	290	270	103	11	95

① R.R.Moore 试验，5 × 10^8 次循环。

2.10.4 工艺参数

固溶处理温度 527℃，时效温度 177℃。

2.10.5 主要用途

厚板、踏板和挤压件，用于要求冲击强度的构件。

2.11 6A02 合金

2.11.1 成分和组织

6A02 合金主要成分（质量分数）为 Mg = 0.45% ~ 0.9%，Si = 0.5% ~ 1.2%，Cu = 0.2% ~ 0.6%。详细成分见本篇第 1 章表 2.1-15。由于含 Cu，过去一直把它看作 Al-Mg-Si-Cu 系锻铝合金。其主要强化相为 Mg_2Si。由于加了少量 Mn 和 Cr（0.15% ~ 0.35%），和 Cu 一起可弥补淬火后停留时间对人工时效带来的强度损失。Cu 的加入，形成四元 w 相，可改变热加工性能。Mn 或 Cr 可细化晶粒，提高力学性能，改善抗蚀性。

2.11.2 物理性能

1）热性能　热导率（25℃，T4 状态）为 155 W·(m·℃)$^{-1}$，比热容见表 2.9-37，线胀系数见表 2.9-38。

表 2.9-37 比热容

温度/℃	100	200	300	400
c/J·(kg·K)$^{-1}$	795	879	963	1 089

表 2.9-38 线胀系数

温度范围/℃	-50 ~ 200	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	21.8	23.5	24.3	25.4

2）密度（20℃）为 2.7 g·cm^{-3}。

3）电性能　电阻率在 T4 和 T6 状态为 55 nΩ·m，O 状态为 48 nΩ·m。

4）磁性能　无磁性。

2.11.3 力学性能

1）技术标准规定的性能见表 2.9-39 和表 2.9-40。

2）拉伸性能见表 2.9-41。

3）各种温度下的力学性能见表 2.9-42。

4）压缩性能见表 2.9-43。

5）冲击性能见表 2.9-44。

表 2.9-39 技术标准规定的性能

技术标准	品种	供应状态	试样状态	δ 或 d/mm	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%
					≥		
YS/T 212—1994 YS/T 214—1994[7]	板材	O	O	0.3～5.0 >5.0～10.0	≤147 ≤147	— —	20[1] 15
		T4	T4	>0.3～0.6 >0.6～3.0 3.0～5.0 >5.0～10.0	196 196 196 177	— — — —	18[1] 20 18 16
		T6	T6	0.3～5.0 >5.0～10.0	294 294	— —	10[1] 8
GB/T 3880—1997	轧制板材	O	O	0.5～4.5 >4.5～10.0	≤145 ≤145	— —	21[2] 16
			T62	0.5～4.5 >4.5～10.0	295 295	— —	11[2] 16
		T4	T4	0.5～0.8 >0.8～2.9 >2.9～4.5 >4.5～10.0	195 195 195 175	— — — —	19[2] 21 19 17[2]
		T4	T6	0.5～4.5 >4.5～10.0	295 295	— —	11[2] 8
		H112	T62	4.5～12.5 >12.5～25.0 >25.0～40.0 >40.0～80.0	295 295 295 275	— — — —	8[2] 7 6 6
		H112	T42	4.5～12.5 >12.5～25.0 >25.0～40.0 >40.0～80.0	175 175 165 165	— — — —	17[2] 14[3] 12 10
GJB 2053—1994	薄板	O	O	1.0～4.0	≤147	—	20[1]
		T4	T4	1.0～3.0 >3.0～4.0	196 196	— —	20[1] 8
		T6	T6	1.0～4.0	295	—	10[1]
GJB 2662—1996	厚板	O	O	4～5 >5～10	≤147 ≤147	— —	2[1] 15
		T4	T4	4～5 >5～10	196 176	— —	18[1] 16
		T6	T6	4～5 >5～10	295 295	— —	10[1] 8
		T112	T4	7～25 >25～40 >40～80	178 167 167	— — —	14[1] 12 10
			T6	7～25 >25～40 >40～80	295 285 275	— — —	7[1] 6 6
GB/T 3191—1998	挤压棒材[4]	T6 H112	T6 T62	≤150	295	—	12[3]
GJB 2054—1994	挤压棒材	H112，T6	T6	5～150	295	—	12[3]
		H112		>150～250	280	—	8[3]
HB 5202—1982		T6	T6	≤240	294	—	12[3]
GB/T 3191—1998	高强棒材[5]	H112 T6	T62 T6	20～120	305	—	8[3]

续表 2.9-39

技术标准	品种	供应状态	试样状态	δ 或 d/mm	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%
					≥		
GJB 2054—1994	高强棒材[5]	H112，T6	T6	20～150	305	—	8[3]
GJB 2507—1995	挤压型材	T4	T4	所有厚度	177	—	14
		H112，T6	T6	所有厚度	294	225	10
GB/T 4437—1984	管材[6]	O T4 T6	O T4 T6	所有直径 所有直径 所有直径	≤147 206 294	— — —	17 14 8
GJB 2381—1995		O T4	O T4	所有直径 所有直径	≤147 205	— —	17[3] 14
		H112，T6	T6	25～120 >120～250	295 275	— —	8[3] 8
GJB 2379—1995	冷拉管	O T4 T6	O T4 T6	所有尺寸 所有尺寸 所有尺寸	≤147 206 304	— — —	17[1] 14 8

① 为 δ_{10}数据。
② 为标距 50 mm 数据。
③ 为 δ_5 数据。
④ 直径 $d>150$ mm 的棒材，其力学性能附报告单。
⑤ 如供应状态为 T6，仅适用于 $d25\sim120$ mm 的棒材。
⑥ 壁厚 $\delta<5$ mm 的管材，室温纵向力学性能由供需双方另行协商或附试验结果；外径 $d185\sim300$ mm，壁厚 $d>32.5$ mm 的管材，室温纵向力学性能由供需双方另行协商。
⑦ 对 YS/T 214—1994 而言，表中厚度 $\delta0.3$ mm 应为 $\delta0.5$ mm。

表 2.9-40 技术标准规定的性能

技术标准	品种	状态	纵向			长横向			HBS
			σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	
			≥						
HB 5204—1982 GJB 2351—1995	自由锻件	T6	275 275	— —	10 11	— —	— —	— —	85 85
	模锻件	T6	295 295	215 215	12 12	265 265	— —	4 4	85 85

表 2.9-41 拉伸性能

品种	状态	规格/mm	试样方向	挤压系数	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%
型材	T6	2×130×30	纵向 长横向	28.5	338 335	314 306	10 12
		10×27×143	纵向 长横向	19.7	353 324	304 270	12 12
带材	T6	20×200	纵向 长横向	16.5	343 319	314 289	14 13.5
棒材	T6	d100	纵向 长横向	12.0	353 314	319 275	14 12.5

表 2.9-42 各种温度下的力学性能

品种	状态	温度/℃	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	品种	状态	温度/℃	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%
挤压件	T6	-196	441	422	14.0	挤压件	T6	150	275	250	13.0
		-70	392	373	13.0			200	235	216	12.0
		20	343	314	12.0			250	157	127	12.0
		100	314	284	12.0						

表 2.9-43 压缩性能

品种	试样方向	状态	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa
型材	纵向	T6	284
模锻件	纵向	T6	265

表 2.9-44 冲击性能

品种	状态	δ 或 d/mm	组织	试样方向	a_{KU}/kJ·m^{-2}
带材	T6	12	未再结晶	纵向	265
				长纵向	186
			再结晶	纵向	255
				长横向	176
带材	T6	65	未再结晶	纵向	333
				长纵向	176
				短横向	108
棒材	T6	20	—	纵向	343

6）剪切性能见表 2.9-45。

表 2.9-45 剪切性能

品种	状态	τ/MPa
挤压件	T6	206
模锻件	T6	191

7）疲劳性能见表 2.9-46。

表 2.9-46 疲劳性能

品种	状态	温度/℃	N/周	σ_{-1}/MPa
—	T6	20	5×10^8	96
—	T4	20	5×10^8	96
—	O	20	5×10^8	92
挤压件	T6	20	2×10^7	118
挤压件	T6	20	2×10^7	113
—	T6	20	2×10^7	108

8）弹性模量 型材、模锻件、锻件和棒材拉伸弹性模量 E 为71 GPa；切变模量 G 为27 GPa；泊松比为0.32。

9）断裂性能 具有未再结晶组织的挤压件的纵向断裂韧度 K_{IC} 为43 MPa·m$^{1/2}$。

2.11.4 焊接性能

可焊性良好，可采用各种焊接方法焊接。熔化极氩弧焊一般用于焊接较厚的工件，钨极氩弧焊一般用于焊接较薄的工件。不宜用基体材料填充金属，否则容易开裂。用4A01合金作填充料时可得到满意的结果。T6状态的材料焊接后，焊缝强度比基体的约低30%。

2.11.5 抗蚀性

6A02合金在大气中，包括工业性大气和海洋性大气，都有良好的抗蚀性。也耐淡水和海水腐蚀。在无机酸中的腐蚀速度取决于浓度和温度，在NaOH和KOH溶液中腐蚀严重。

自然时效状态下的抗蚀性好，相当于3A21合金的，人工时效状态有晶间腐蚀倾向。铜含量控制在低限，可保证满意的抗蚀性。

2.11.6 工艺参数

熔炼温度700～750℃；铸造温度700～740℃。均匀化退火温度530℃，轧制温度410～500℃，挤压温度370～450℃，锻造温度400～500℃。固溶处理温度510～530℃，过烧温度570℃。人工时效规范：155～165℃，8～15 h；自然时效时间10 d以上。

在450～500℃进行压力加工时塑性很好，可实现高速变形。但6A02不可能像6063那样在挤压机上靠风冷实现淬火，因为临界淬火冷却速度比6063的大。

2.11.7 主要用途

半成品有板材、棒材、管材、型材和锻件。

用作飞机发动机零件，要求有高塑性和高抗蚀性的机械零件，建筑结构件等。

编写：郑子樵（中南大学）
审稿：唐仁政（中南大学）

第 10 章　7×××系铝合金

1　概述

在 Al-Zn-Mg 系合金中，可以分为含 Cu 和不含 Cu 两类。含 Cu 的因其强度在硬铝中是最高的，又名超硬铝。

不含 Cu 的 Al-Zn-Mg 系合金，主要特点是焊接性能好。有良好的自淬火效应，厚度小于 18 mm 的零、部件，淬火空冷就能获得过饱和固溶体。如此一来，焊接的大型零部件，如车辆、桥梁和建筑用材料等，焊接后不需再进行热处理。但是，如果 Zn 和 Mg 的含量超过 6%，自淬火效应消失，对应力腐蚀的敏感性增大。

Al-Zn-Mg 系不含 Cu 的合金，其主要强化相是 $T(Al_2Mg_3Zn_3)$ 和 $\eta(MgZn_2)$。这类合金室温强度（σ_b）为 340～450 MPa，虽然比硬铝和超硬铝低，但比 Al-Mg-Si 系或 Al-Mg 系合金高，故称中强可焊铝合金。

为了提高这类合金的抗应力腐蚀能力，还经常加入少量的 Mn（0.2%～0.45%）、Cr（≤0.3%）、Zr（0.15%～0.3%）、Ti（<0.2%）和 Cu（<0.25%）等。Cr 的作用最明显，Cu 能提高强度和抗应力腐蚀能力，但对焊接性能不利，故焊接用 Al-Zn-Mg 系合金含 Cu 量要<0.2%。

Al-Zn-Mg 系合金中 Zn+Mg 的总含量≥8%～9%以后，强度虽然可以提高到 600 MPa 以上，但塑性和抗应力腐蚀性能下降，失去了使用价值。Cu 能显著改善 Al-Zn-Mg 系合金的塑性和抗蚀性，特别是 Cr 能强烈地提高抗应力腐蚀性能，给超硬铝提供了广泛应用的可能。

国产超硬铝中，Zn、Mg 和 Cu 的平均总含量为 9.75%～13.5%，Zn/Mg 为 2.61～4.68。属于 $\alpha+T$（$Al_2Mg_3Zn_3$）型热处理可强化铝合金。Mg 含量过高对塑性不利，因此要求有高的铆接性能（7A03）和锻压塑性的超硬铝，应该有高的锌镁比。

加 Cu 主要是为改善抗应力腐蚀能力，同时提高强度和塑性。加 Mn、Cr、Zr 和 Ti 对超硬铝的影响与无 Cu 的 Al-Zn-Mg 系合金一样。Mn 和 Cr 能增加超硬铝的淬火敏感性，Cr 的影响比 Mn 还大，必须用高的淬火冷却速度才能保证时效后的强度。厚板和大型锻件即使用高速冷却淬火，也淬不透，还容易产生严重变形。近年来在无 Mn 和 Cr 的合金中加微量 Zr（0.08%～0.25%），形成 $ZrAl_3$ 不溶解质点，不仅能降低淬火应力，而且能得到高的强度。

Fe 和 Si 为有害杂质，为保证合金的断裂韧度，Fe 和 Si 杂质含量应降低。

有代表性的超硬铝 7A04，与 7075 相当，主要强化相为 $\eta(MgZn_2)$、$T(Al_2Mg_3Zn_3)$ 和 $S(Al_2CuMg)$ 相，杂质相是 $(FeMn)Al_6$ 和 Al(FeMn)Si 相等。

7A03 合金是铆钉用超硬铝，强度与 7A04 合金相当，但塑性高，能进行铆接。

国际注册 7×××系合金牌号有 60 余个，我国国家标准中有 18 个，其牌号及成分见本篇第 1 章表 2.1-15。

2　合金各论

2.1　7A05、7005 合金

2.1.1　成分和组织

该合金强度高，硬度高，可制成挤压结构元件。有应力腐蚀开裂倾向。在用该合金制造工件时，为了预防应力腐蚀开裂，机械加工面与锯切面的横向上不得受应力。工件冷成形时，应采用退火状态材料，然后进行热处理，也可用固溶热处理状态材料冷成形，随后进行人工时效。对于在腐蚀介质中工作的工件，如海水中，焊接后进行人工时效可避免热影响区发生选择性腐蚀。

它们是无 Cu 的 Al-Zn-Mg 合金，其主要成分（质量分数）为：Zn=4.0%～5.0%，Mg=1.0%～1.8%，还有少量 Mn、Cr、Ti 和 Zr。详细成分见本篇第 1 章表 2.1-8。

其主要强化相为 $T(Al_2Mg_3Zn_3)$ 和 $\eta(MgZn_2)$，还有些少量的其他相和杂质相。

2.1.2　物理性能

1）密度（20℃）为 2.78 $g\cdot cm^{-3}$。

2）热性能　线胀系数见表 2.10-1。比热容（20℃）为 875 J/（kg·K）。热导率：20℃，O 状态为 166 W/（m·K）；T53，T5351，T63，T6351 状态为 148 W/（m·K）；T6 状态为 137 W/（m·K）。

表 2.10-1　7005 合金不同温度范围的线胀系数

温度范围/℃	-50～20	20～100	20～200	20～300
平均线胀系数/10^6K^{-1}	21.3	23.1	24.0	25.0

3）电性能　电导率：20℃，O 状态为 43% IACS；T53，T5351，T63，T6351 状态为 38% IACS；T6 状态为 35% IACS。电阻率：20℃，O 状态为 40.1 nΩ·m；T53，T5351，T63，T6351 状态为 45.4 nΩ·m；T6 状态为 49.3 nΩ·m。各种状态下的电阻温度系数都约为 0.1 nΩ·m/K。

2.1.3　力学性能

1）典型力学性能见表 2.10-2。

2）最低力学性能见表 2.10-3。

表 2.10-2　7005 合金的典型力学性能

状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	抗剪强度 τ/MPa	疲劳强度 σ_{-1}/MPa	平面应变断裂韧度 /$MPa\cdot m^{1/2}$
O	193	83	20	117	①	T6351：长横向 51.3 横向 44，高长向 30.3
T53	393	345	15	221		
T6、T63、T6351	372	317	12	214		

① 旋转梁试样，循环 10^8 次，T6351 厚板。光滑试样 115～130 MPa；60°切口试样 20～50 MPa；T53 挤压件：光滑试样 130～150 MPa，60°切口试样 24～40 MPa。轴向（$R=0$），循环 10^8 次，光滑试样：T6351 厚板 195 MPa，T53 挤压件 231 MPa。

3）不同温度下的力学性能见表 2.10-4。

2.1.4　工艺参数

退火温度 345℃，固溶处理温度 400℃，热处理状态 T53：热加工（挤压）淬火，室温下自然时效 72 h，然后实行两段人工时效：100～110℃时效 8 h 和 145～155℃时效 16 h。

表 2.10-3　7005 合金的最低力学性能

状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ[①] /%	抗压屈服强度/MPa	抗剪强度 τ/MPa	抗剪屈服强度/MPa	支承强度 /MPa	支承屈服强度/MPa
挤压材料 T53								
纵向	345	303	10	296	193	172	655[②]，496[③]	503[②]，407[③]
长横向	331	290	—	303	—	—	—	—
薄板及厚板								
T6[④]、T63[⑤]、T6351[⑤]	324	262	—	269	186	152	634[②]，483[③]	448[②]，365[③]

① 标距 50 mm 或 $4d$，d 为试样工作处的直径。② $e/d=2.0$，e 为边距，d 为杆柱直径。③ $e/d=1.5$。④ 厚度≤6.35 mm。⑤ 厚度 6.35～75 mm。

表 2.10-4　7005-T53 合金在不同温度时的典型力学性能[①]

温度/℃	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	抗剪强度 τ/MPa
-269	641	483	16	室温，O 状态 117；T53 状态 221；T6、T63、T6351 状态 214
-196	538	421	16	
-80	441	379	13	
-28	421	359	14	
24	392	345	15	
100	303	283	20	
149	165	145	35	
204	97	83	60	
260	76	66	80	

① 在所列温度下无负载保温 10 000 h 后，以 35 MPa/min 的应力施加速度试验到屈服强度，再以每分钟 5% 的应变速度拉至断裂。

2.1.5　主要用途

1）典型用途　挤压结构件，如桁架导轨，交叉杆角柱、边柱，以及卡车、拖车、货物容器和快运车的加劲杆。通常应用于要求具有高强度和高断裂韧度的焊接或钎焊的组件，例如大的热交换器，尤其是在焊接后不能实行固溶热处理的场合下应用。还应用于体育器械如网球拍和垒球棒。

2）使用说明　为避免出现应力腐蚀裂纹，在机加工或锯切的暴露表面上应避免横向应力。构件在退火状态下冷变形，然后进行热处理，或者在固溶热处理状态下冷变形，然后人工时效。用在接触腐蚀性电解质如置于海水中的部件，若在焊接后给予时效处理，则可避免焊接组件在受热影响的区域发生选择性腐蚀。当使用环境易于发生电池腐蚀时，只能把 7005 合金构件同与之具有相似电解质溶液电动势的铝合金部件连接在一起使用，或者对连接面予以保护或绝缘。

2.2　7A31 合金

2.2.1　成分和组织

该合金的主要特点是具有较高强度，经退火后有良好的机加工性能，可进行锻造、旋压、落锤锻打加工。焊接强度和延展性很好，7A31-T64 通常的性能相当好。

其主要成分（质量分数）为：Zn＝3.6%～4.5%，Mg＝2.5%～3.3%，Cu＝0.1%～0.4%，还有少量 Mn、Cr、Ti 和 Zr 等元素。详细成分见本篇第 1 章表 2.1-15。

可热处理强化，强化相为 $T(Al_2Mg_3Zn_3)$，$\eta(MgZn_2)$。组织中还有少量其他相和杂质相。

2.2.2　物理性能

1）密度（20℃）为 2.73 g/cm^3。

2）热性能　平均线胀系数（20～100℃）为 23.4×10^{-6} K^{-1}；热导率（20℃）为 125～155 W/（m·K）。

3）电性能　电导率为 32%～40% IACS；电阻温度系数为 0.1 nΩ·m/K。

2.2.3　力学性能

1）典型力学性能见表 2.10-5。

表 2.10-5　7A31 合金典型力学性能

性能	试样取向[①]	T64	T61	O
抗拉强度/MPa	纵向	450	400	277
	横向	450	400	227
屈服强度/MPa	纵向	380	330	103
	横向	380	330	103
伸长率/%	纵向	13	14	22
	横向	13	14	22
抗压屈服强度/MPa	纵向	400	380	—
	横向	415	407	—
抗剪强度/MPa	纵向	270	—	—
	横向	255	235	—
支承强度[②]/MPa	纵向	910	—	—
	横向	910	827	—
布氏硬度 HBS	—	133	123	61

① 厚 6～75 mm 板材。
② $e/d=2$，e 是边距，d 是芯杆直径。

2）疲劳性能见图 2.10-1。

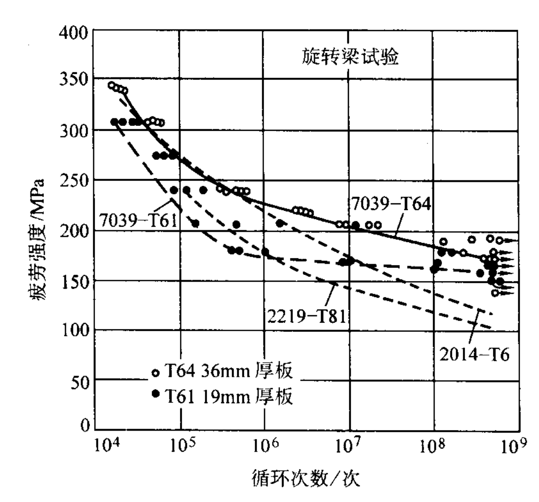


图 2.10-1　7A31 合金厚板的旋转梁疲劳数据与 2014 与 2219 合金的疲劳特性的对比图
7A31 合金的数据是 ϕ7.5 mm 无切口试样进行至少四次纵向试验的结果，2014 和 2219 合金的特性曲线引自公开发表文献的平均值

3）冲击性能见表2.10-6。

表2.10-6 7A31-T64厚板的横向冲击吸收功

板厚/mm	试验温度/℃	标长50 mm的伸长率/%	无切口的冲击吸收功/J	带切口的冲击吸收功/J
45	24	12	66.2	7.6
	-195	12	87.5	6.5
38	24	11	75.3	7.5
	-195	11	96.7	8.3

2.2.4 焊接性能

采用直流惰性气体保护钨极弧焊接（TIG）和惰性气体保护金属弧焊接（MIG）工艺，用X5039或5183铝合金棒作焊条易于焊接。焊接强度和延展性相当好（比5083好）。焊接厚度范围大，且焊缝韧性不因厚度增加而降低。用X5039合金做焊条时，箔制焊接的厚板具有良好的抗开裂性。室温焊缝强度平均为360 MPa，而在-195℃时增至448 MPa。不需专门的焊前或焊后热处理。

2.2.5 抗蚀性能

7A31-T64的抗通常的腐蚀性能可以与抗腐蚀性能较好的铝镁合金如5052、5086和5083相媲美，而且远远优于大多数的可热处理强化的铝合金。在标准的6%NaCl溶液中浸渍试验6个月，或在5%NaCl盐雾中进行试验的结果表明，仅有轻微的表面发污和轻微浅坑，但其性能并没有明显降低。在氯化钠-过氧化氢试验中，未发现晶间腐蚀迹象。

2.2.6 工艺参数

1）固溶处理　加热至460～500℃，保温2 h，冷水淬火。板坯的固溶温度为490～500℃，挤压坯的固溶温度为460～470℃。

2）时效　T6状态：120℃，20～24 h，空冷。

3）退火处理　O状态：415～455℃，2～3 h，空冷；再加热至230℃保温4 h后空冷。或者加热至355～370℃空冷。

4）消除应力退火　355～370℃，保温2 h，空冷至室温。

2.2.7 主要用途

冷冻储存箱，防火压力容器，军用器材箱，装甲板，导弹装置，低温加工设备和储存箱。

2.3 7050合金

2.3.1 成分和组织

7050合金的特点是既具有很高强度、良好的抗剥落腐蚀及抗应力腐蚀能力，同时还具有高的断裂韧度及疲劳强度。加工制造工件时可挤压，自由锻及模锻。

7050合金主要成分（质量分数）为：Zn=5.7%～6.7%，Mg=1.9%～2.6%，Cu=2.0%～2.6%，还加少量Zr。详细成分见本篇第1章表2.1-15。其主要强化相为η($MgZn_2$)、T($Al_2Mg_3Zn_3$)和S(Al_2CuMg)相，还有含Zr相和杂质相。

2.3.2 物理性能

1）密度（20℃）为2.83 g/cm^3。

2）热性能　液相线温度635℃，固相线温度524℃。线胀系数见表2.10-7。体胀系数（20℃）为$68.0\times10^{-6}K^{-1}$。比热容（20℃时）为860 J/（kg·K）。热导率：20℃时，O状态为180 W/（m·K）；T76，T7651状态为154 W/（m·K）；T736，T73651状态为157 W/（m·K）。

表2.10-7 7050合金不同温度范围的平均线胀系数

温度范围/℃	-50～20	20～100	20～200	20～300
平均线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$	21.7	23.5	24.4	25.4

3）电性能　电导率：20℃时，O状态为47% IACS；T76，T7651状态为39.5%IACS；T736，T73651状态为40.5% IACS。电阻率：20℃时，O状态为36.7 nΩ·m；T76，T7651状态为43.6 nΩ·m；T736，T73651状为42.6 nΩ·m。所有状态下，电阻温度系数为0.1 nΩ·m/K。

2.3.3 力学性能

1）泊松比为0.33。

2）拉伸弹性模量70.3 GPa；切变模量26.9 GPa；压缩弹性模量73.8 GPa。

3）最低力学性能见表2.10-8和表2.10-9。

4）典型力学性能见表2.10-10。

5）疲劳性能见表2.10-11。

表2.10-8 7050-T 736（或-T 74）合金模锻件的最低力学性能

性　能	试样取向	厚度/mm			
		≤25.4	25.4～101.6	101.6～127	127～152.4
抗拉强度/MPa	纵向	496	490	483	483
	横向	469	462	455	455
屈服强度/MPa	纵向	427	421	414	405
	横向	386	379	372	372
抗压屈服强度/MPa	纵向	434	434	434	427
	横向	400	393①	379	372
抗剪强度/MPa	—	290	283	283	283
支承强度/MPa	$e/d=1.5$	683	676	669	669
	$e/d=2.0$	903	889	876	876
支承屈服强度/MPa	$e/d=1.5$	565	558	545	538
	$e/d=2.0$	662	655	641	634
伸长率②/%	纵向	7	7	7	7
	横向	5	4	3	3

① 对于厚度为76.2～127 mm的锻件，为386 MPa。② 标长为50 mm。

表 2.10-9 7050 合金 T73652 状态自由锻件的最低力学性能

性 能	试样取向	厚度/mm						
		≤50.8	51～76	76～101	101～127	127～152	152～178	178～203
抗拉强度/MPa	纵向	496	496	490	483	476	469	462
	长横向	490	483	483	476	469	462	455
	短横向	—	462	462	455	455	448	441
屈服强度/MPa	纵向	434	427	421	414	407	400	393
	长横向	421	414	407	500	386	372	359
	短横向	—	379	379	372	365	352	345
抗压屈服强度/MPa	纵向	441	434	427	421	414	407	400
	长横向	448	441	434	427	414	400	386
	短横向	—	421	421	414	407	393	379
抗剪强度/MPa	—	290	283	283	283	276	269	269
支承强度/MPa	$e/d=1.5$	689	683	683	669	662	655	641
	$e/d=2.0$	903	896	896	883	869	855	841
支承屈服强度/MPa	$e/d=1.5$	593	586	572	565	545	524	503
	$e/d=2.0$	696	689	676	662	641	621	593
伸长率/%	纵向	9	9	9	9	9	9	9
	长横向	5	5	5	4	4	4	4
	短横向	—	4	4	3	3	3	3

表 2.10-10 7050 合金的典型力学性能

状 态	温度/℃	在实验温度下保持时间/h	在实验温度下			加热后在室温下		
			抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率①/%	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率①/%
T73651 厚板	24		510	455	11	510	455	11
	100	0.1～10	441	427	13	510	455	11
		100	448	434	13	510	462	12
		1 000	441	427	14	510	455	12
		10 000	441	421	15	510	441	12
	149	0.1	393	386	16	510	455	11
		0.5	393	386	17	510	448	12
		10	393	386	18	503	441	12
		100	359	332	19	483	407	13
		1 000	290	276	21	407	317	13
		10 000	221	193	29	331	228	14
T73651 厚板	177	0.1	359	345	19	510	448	12
		0.5	352	345	20	496	441	12
		10	324	310	22	469	400	13
		100	248	234	25	386	296	13
		1 000	193	172	31	317	214	14
		10 000	159	124	40	248	152	15
	204	0.1	303	290	22	490	434	12
		0.5	290	276	23	469	421	12
		10	221	207	27	386	283	13
		100	165	152	32	317	200	14
		1 000	131	110	45	262	138	16
		10 000	117	90	54	234	117	19
T73652 锻件	-196	—	662	572	13	—	—	—
	-80	—	586	503	14	—	—	—
	-28	—	552	476	15	—	—	—
	24	—	524	455	15	524	455	15

续表 2.10-10

状　态	温度/℃	在实验温度下保持时间/h	在实验温度下			加热后在室温下		
			抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率[①]/%	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率[①]/%
T73652 锻件	100	0.1~10	462	427	16	524	455	15
		100	469	434	16	524	462	15
		1 000	462	427	17	524	524	16
		10 000	462	421	17	517	517	16
	149	0.1	414	386	17	517	455	15
		0.5	414	386	17	510	448	15
		10	407	386	18	503	441	16
		100	365	352	20	483	407	16
		1 000	290	276	23	407	317	17
		10 000	221	193	29	331	228	17
	177	0.1	379	345	19	510	448	15
		0.5	365	345	20	496	441	15
		10	324	310	22	469	400	16
		100	248	234	25	386	296	17
		1 000	193	172	31	317	214	17
		10 000	159	124	40	248	152	18
	204	0.1	324	290	22	503	434	15
		0.5	296	276	23	483	421	15
		10	221	207	27	386	283	16
		100	165	152	32	317	200	17
		1 000	131	110	45	262	138	19
		10 000	117	90	54	234	117	22

① 测伸长率标距长 50 mm。

表 2.10-11　7050 合金在循环 10^7 次时的典型轴向疲劳强度

产品及状态		应力比 R	疲劳强度(最大应力)/MPa	
			光滑试样	有切口试样[①]
厚板，25~150 mm	T6 型状态	0.0	190~290	—
	T73 状态	0.0	170~330	50~90
挤压件，29.5 mm	T76511 状态	0.5	320~340	110~125
		0.0	180~210	70~80
		-1.0	130~150	35~50
模锻件，25~150 mm	T736 状态	0.0	210~275	75~115
自由锻件，144 mm×559 mm×2 130 mm T73652 状态	纵向	0.5	325	145
		0.0	225	90
		-1.0	145	50
	长横向	0.5	275	115
		0.0	170	90
		-1.0	125	50
	短横向	0.5	260	115
		0.0	170	60
		-1.0	115	50

① 切口疲劳因子，$K_1=3.0$。

6）断裂性能见表 2.10-12 和表 2.10-13。

2.3.4 工艺参数

退火温度 415℃，固溶处理温度 475℃，时效温度 120~175℃。

2.3.5 主要用途

需要合金应有高的强度，同时还要具有高的抗剥落腐蚀和抗应力腐蚀断裂性能，以及高的断裂韧度和抗疲劳性能，如应用于飞机结构件中板件、挤压件、自由锻或模锻件等。

表 2.10-12　7050 合金的平面-应变断裂韧度

材料状态	产品种类	试样取向	最小值/MPa·$m^{1/2}$	平均值/MPa·$m^{1/2}$
T73651	厚板	长横向	26.4	35.2
		横长向	24.2	29.7
		短长向	22.0	28.6
T7651X	挤压材	长横向	—	30.8
		横长向	—	26.4
		短长向	—	20.9
T7351X	挤压材	长横向	—	45.1
		横长向	—	31.9
		短长向	—	26.4
T736	模锻件	长横向	27.5	36.3
		横长向，短长向	20.9	25.3
T73652	自由锻件	长横向	29.7	36.3
		横长向	18.7	23.1
		短长向	17.6	22.0

表 2.10-13　7050-T3651 合金板的蠕变与断裂性能

温度/℃	施加应力的时间/h	断裂应力/MPa	加热后在室温下的蠕变应力/MPa			
			1.0%	0.5%	0.2%	0.1%
24	0.1	510	496	476	455	448
	1	503	483	462	448	441
	10	490	469	455	441	441
	100	476	455	448	441	434
	1 000	469	448	441	—	—
100	0.1	441	434	427	421	414
	1	427	414	407	400	386
	10	407	393	365	345	331
	100	379	372	365	345	331
	1 000	359	352	345	317	—

续表 2.10-13

温度/℃	施加应力的时间/h	断裂应力/MPa	加热后在室温下的蠕变应力/MPa			
			1.0%	0.5%	0.2%	0.1%
149	0.1	372	365	359	345	324
	1	345	338	324	303	290
	10	310	303	290	269	228
	100	262	255	241	193	152
	1 000	179	179	165	145	124

2.4 7075、7A09合金

2.4.1 成分和组织

这两个合金是Al-Zn-Mg-Cu系超硬铝，其特点是固溶处理后塑性好，热处理强化非常明显。在150℃以下有高的强度，还有良好的低温强度。焊接性能较差。有应力腐蚀开裂倾向，需经包铝或其他保护处理后使用。采用双级时效可提高抗应力腐蚀开裂能力。

这两个合金主要成分（质量分数）基本相同，Zn = 5.1% ~ 6.1%，Mg = 2.0% ~ 3.0%，Cu = 1.2% ~ 2.0% 及 Cr = 0.16% ~ 0.30%，详细成分见本篇第1章表2.1-15。

其主要强化相为η($MgZn_2$)、T($Al_2Mg_3Zn_3$)和S(Al_2CuMg)，还有些杂质相。

2.4.2 物理性能

1）密度（20℃）为2.80 g/cm³

2）热性能　线胀系数见表2.10-14。体胀系数（20℃）为$68\times10^{-6}K^{-1}$。比热容（100℃）为960 J/（kg·K）。热导率：20℃，T6、T62、T651和T652状态为130 W/（m·K）；T76、T7651状态为150 W/（m·K）；T73、T7351和T7352状态为155 W/（m·K）。

表2.10-14　不同温度范围的平均线胀系数

温度范围/℃	-50~20	20~100	20~200	20~300
平均线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$	21.6	23.4	24.3	25.2

3）电性能　电导率：20℃时，T6、T62、T651和T652状态为33% IACS；T76、T751状态为38.5% IACS；T73、T7351和T7352状态为40% IACS。电阻率：20℃时，T6、T62、T651和T652状态为52.2 nΩ·m；T76、T7651状态为44.8 nΩ·m；T73、T7351和T7352状态为43.1 nΩ·m。所有状态电阻温度系数为0.1 nΩ·m/K。

2.4.3 力学性能

1）室温力学性能见表2.10-15。

表2.10-15　7075合金的力学性能

状态及厚度	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ①/%
典型性能			
O	228	103	17
T6、T651	572	503	11
T73	503	434	—
Alclad O	221	97	17
T6、T651	524	462	11
以下最低（min）性能			
薄板与厚板			
O	276max	145max	10
薄板			
T6、T62			
0.2~0.28 mm	510	434	5
0.3~0.99 mm	524	462	7
0.3~3.1 mm	538	469	8
3.2~6.3 mm	538	476	8
T73	462	386	8
T76	602	427	8
厚板			
T62、T651			
6.3~12.6 mm	538	462	9
12.7~25.0 mm	538	469	7
25.1~50 mm	531	462	6
50.1~63.5 mm	524	441	5
64~76 mm	496	421	5
76.1~88 mm	490	400	5
88.1~100 mm	462	372	3
T7351			
6.35~50 mm	476	393	6~7
50.1~63.5 mm	455	359	6
64~76 mm	441	338	6
T7651			
6.3~12.6 mm	496	421	8
12.7~25 mm	490	414	6

状态及厚度	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ①/%
包铝薄板与厚板			
O			
0.2~1.5 mm	248max	138max	9~10
1.6~4.7 mm	262max	138max	10
4.8~12.6 mm	269max	145max	10
12.7~25 mm	276max	—	10
包铝薄板			
0.2~0.28 mm	469	400	5
0.30~0.99 mm	483	414	7
1.0~1.5 mm	496	427	8
1.6~4.7 mm	503	434	8
4.8~6.3 mm	517	441	8
T73			
1.0~1.5 mm	434	352	8
1.6~4.7 mm	441	359	8
4.8~6.3 mm	455	372	8
3~4.7 mm	496	393	8
4.8~6.3 mm	483	407	8
包铝厚板			
T62、T651			
6.3~12.6 mm	517	448	9
12.7~25 mm	538②	469②	7
26~50 mm	531②	462②	6
51~63 mm	524②	441②	5
64~75 mm	496②	421②	5
76~88 mm	490②	400②	5
89~100 mm	462②	372	3
T7351			
6.3~12.6 mm	455	372	8
12.7~25 mm	476	393	7
T7651			
6.3~12.6 mm	476	400	8
12.7~25 mm	490②	414②	6

① 标距50 mm或4d，d为试样缩颈部分直径；本栏数字如为范围值，则表示材料伸长率随其厚度而变化。
② 厚度≥13 mm的厚板，所列数值仅适用于未包铝的材料，如有包铝层则其性能略低些，而下降量则决定于包铝层厚度。

2）不同温度下的力学性能见表2.10-16。

表2.10-16　7075合金在不同温度下的典型力学性能

温度/℃	抗拉强度① σ_b/MPa	屈服强度① $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率② δ/%
T6、T651			
-196	703	634	9
-80	621	645	11
-28	593	517	11
24	572	503	11
100	483	448	14
149	214	186	30
204	110	87	55
260	76	62	65
316	55	45	70
371	41	32	70
T73、T7351			
-196	634	496	14
-80	545	462	14
-28	524	448	13
24	503	434	13
100	434	400	15
149	214	186	30
204	110	90	55
260	76	62	65
316	55	45	70
371	41	32	70

①　在所示温度无负载保温10 000 h测得的最低力学性能，先以35 MPa/min的应力施加速度试验到屈服强度，而后以每分钟5%的应变速度拉至断裂。

②　标距50 mm。

3）断裂韧度见表2.10-17。

表2.10-17　7075合金的典型平面应变断裂韧度

产品及状态	最低值 /MPa·m$^{1/2}$	平均值 /MPa·m$^{1/2}$	最大值 /MPa·m$^{1/2}$
长横向			
厚板			
T651	27.5	38.6	39.7
T7351	—	33.0	—
挤压型材			
T6510，1	38.6	36.8	35.2
T73110，1	34.1	36.3	37.4
锻件			
T652	26.4	28.6	30.8
T7352	29.7	34.1	38.5
横长向			
厚板			
T651	22.0	24.2	25.3
T7351	27.5	31.9	36.3
挤压型材			
T6510，1	20.9	24.2	28.6
T7310，1	24.2	26.4	30.8
锻件			
T652	—	25.3	—
T7352	25.3	27.5	28.6

续表2.10-17

产品及状态	最低值 /MPa·m$^{1/2}$	平均值 /MPa·m$^{1/2}$	最大值 /MPa·m$^{1/2}$
短长向			
厚板			
T651	16.5	17.6	19.8
T7351	20.9	22.0	23.1
挤压型材			
T6510，1	19.8	20.9	24.2
T7310，1	—	22.0	—
锻件			
T651	—	18.7	—
T7351	20.9	23.1	27.5

4）其他力学　抗剪强度：合金（裸）和包铝合金，O状态为152 MPa；合金（裸）T6，T651状态为331 MPa；包铝合金T6，T651状态为317 MPa。硬度：O状态为60HBS；T6，T651状态：150HBS。泊松比为0.33。拉伸弹性模量71.0 GPa；切变模量26.9 GPa；压缩弹性模量72.4 GPa。疲劳强度：T6、T651和T73状态，光滑无切口试件在R.R.Moore型测试，循环5×10^8次，为159 MPa。

2.4.4　焊接性能

7075合金由于锌、镁、铜含量都高，所以很容易产生焊接裂纹，不能采用基体材料作填充金属，一般采用Al-Mg系合金作填充金属可减小裂纹倾向性。填充金属中加入钛、锆或钛和硼对减少焊接裂纹有一定的作用，锆对防止焊缝应力腐蚀开裂也有益。由于7075合金自然时效能力强，焊缝强度通过一段时间得到基本恢复。一般采用点焊和缝焊，电弧焊采用较少。

2.4.5　抗蚀性能

一般抗蚀性不好，而且应力腐蚀开裂是7075合金的严重缺点。该合金的抗蚀性还与热处理工艺有关。因为7075合金在热处理过程中最容易出现无沉淀带，引起晶间腐蚀和应力腐蚀开裂。人工时效，尤其是采用分级人工时效过时效工艺可提高合金的抗蚀性。抗应力腐蚀性能与电导率之间有一定的关系，时效后，电导率低者抗应力腐蚀性能差。用4A01合金包覆7075合金，有可靠的保护作用。

2.4.6　工艺参数

熔炼温度700～750℃，铸造温度：方锭685～700℃，圆锭720～730℃。均匀化退火温度460℃。典型退火温度415℃。固溶处理温度：管、棒、型材460～470℃，板材469～475℃，锻件460～476℃，淬火冷却速度不能低于280℃/s，否则对材料的力学性能和抗蚀性均有明显的不利影响。

人工时效规范如下。单级时效：115～125℃，24 h。双级时效：第一级，100～110℃，6～8 h；第二级，板材160～170℃，24～30 h；轧制件170～180℃，8～10 h；挤压件170～180℃，6～8 h；锻件170～180℃，8～10 h。

2.4.7　主要用途

可加工成板材（包铝与不包铝），管材、型材，棒材和锻件。

主要用作飞机结构件和其他高强度抗腐蚀结构件。

2.5　7475合金

2.5.1　成分和组织

7475合金属Al-Zn-Mg-Cu系合金，可热处理强化，是在7075合金基础上提高了合金纯度，减少了Fe和Si的含量，使第二相成分总量降低，提高了合金的断裂韧度，综合性能优化。

其主要化学成分（质量分数）为：Zn = 5.2% ~ 6.2%，Mg = 1.9% ~ 2.6%，Cu = 1.2% ~ 1.9%，还加有少量Cr（0.18% ~ 0.25%）。主要强化相为η($MgZn_2$)、T($Al_2Mg_3Zn_3$)和S(Al_2CuMg)相。还有少量$Al_{18}Mg_3Cr_2$相及杂质相。

2.5.2　物理性能

1）密度（20℃）为2.80 g/cm³。

2）热性能　平均线胀系数见表2.10-18，体胀系数（20℃）为$68\times10^{-6}K^{-1}$；比热容（20℃）为865 J/(kg·K)；热导率（20℃）不同状态的热导率见表2.10-19。

表2.10-18　7475合金不同温度范围的平均线胀系数

温度范围/℃	-50~20	20~100	20~200	20~300
平均线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$	21.6	23.4	24.3	25.2

表2.10-19　7475合金不同状态的热导率

状态	O	T61、T651	T761、T7651	T7351
热导率/W·(m·K)$^{-1}$	177	142	155	163

3）电性能　20℃时不同状态的电导率和电阻率见表2.10-20，20℃时各种状态电阻温度系数的平均值为0.1 nΩ·m/K。

表2.10-20　7475合金不同状态的电导率和电阻率

状态	O	T61、T651	T761、T7651	T7351
电导率/%IACS	46	36	40	42
电阻率/nΩ·m	37.5	47.9	43.1	41.1

2.5.3　力学性能

1）不同温度下典型力学性能见表2.10-21。

表2.10-21　7475合金在不同温度时的典型拉伸性能

温度/℃	保温时间/h	在所示温度的性能			保温后在室温下的性能		
		抗拉强度σ_b/MPa	屈服强度$\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率①δ/%	抗拉强度σ_b/MPa	屈服强度$\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率①δ/%
T61薄板，厚1~6.35 mm							
-196	—	683	600	10	—	—	—
-80	—	607	545	12	—	—	—
-28	—	579	517	12	—	—	—
24	—	552	496	12	552	496	12
100	0.1~0.5	496	462	14	552	496	12
	10	496	462	14	558	496	12
	100	503	469	13	558	503	12
	1 000	503	476	13	565	510	12
	10 000	483	448	14	552	490	13
149	0.1~0.5	434	414	18	552	496	12
	10	434	414	17	545	490	12
	100	379	372	19	510	434	12
	1 000	262	255	23	400	310	13
	10 000	207	179	28	310	207	14
177	0.1	386	365	19	545	490	12
	0.5	379	365	19	538	483	12
	10	324	310	21	490	41	12
	100	228	221	23	386	290	12
	1 000	172	159	30	303	193	14
	10 000	131	110	40	234	124	15
204	0.1	331	317	17	531	469	12
	0.5	296	283	19	496	427	12
	10	200	193	26	372	376	12
	100	145	138	35	296	186	13
	1 000	110	97	45	234	117	15
	10 000	7	76	55	207	97	18

续表 2.10-21

温度/℃	保温时间/h	在所示温度的性能			保温后在室温下的性能		
		抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率[①] δ/%	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率[①] δ/%
232	0.1	234	221	19	490	414	12
	0.5	200	186	21	421	331	12
	10	138	131	30	303	193	13
	100	97	90	45	241	124	14
	1 000	83	76	60	214	97	18
	10 000	83	62	65	193	76	22
260	0.1	159	152	20	407	310	12
	0.5	131	124	25	338	221	12
	10	90	83	45	255	131	15
	100	76	69	60	228	97	19
	1 000	69	59	70	207	83	21
	10 000	66	48	70	186	69	22
316	0.1	76	69	35	317	193	13
	0.5	69	62	45	269	131	15
	10	48	41	65	241	90	19
	100	45	38	75	221	83	20
	1 000	45	38	80	207	76	21
	10 000	45	38	80	186	69	—
371	0.1	41	34	70	276	117	17
	0.5	38	32	70	—	—	—
	10 ~ 10 000	34	27	85	—	—	—
427	0.1	24	20	85	—	—	—
	0.5	23	19	85	—	—	—
482	—	18	15	50	—	—	—
538	—	11	9	3	—	—	—
T761 薄板，厚 1 ~ 6.35 mm							
-196	—	655	565	11	—	—	—
-80	—	579	503	12	—	—	—
-28	—	552	483	12	—	—	—
24	—	524	462	12	524	462	12
100	0.1 ~ 10	455	434	14	524	462	12
	100 ~ 1 000	455	434	13	531	469	12
	10 000	441	421	14	524	462	13
149	0.1 ~ 0.5	400	386	18	524	462	12
	10	393	379	17	524	455	12
	100	359	345	19	490	421	12
	1 000	362	255	23	400	303	13
	10 000	207	179	28	310	207	14
177	0.1	352	338	19	517	455	12
	0.5	352	331	19	517	455	12

续表 2.10-21

温度/℃	保温时间/h	在所示温度的性能			保温后在室温下的性能		
		抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率[①] δ/%	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率[①] δ/%
T761 薄板，厚 1～6.35 mm							
177	10	303	290	21	469	393	12
	100	228	221	23	379	283	12
	1 000	172	159	30	303	193	14
	10 000	131	110	40	234	124	15
204	0.1	290	269	17	503	434	12
	0.5	276	262	19	483	414	12
	10	200	193	26	372	276	12
	100	145	138	35	296	186	13
	1 000	110	97	45	234	117	15
	10 000	97	76	55	207	97	18
232	0.1	221	207	19	462	386	12
	0.5	193	179	21	414	324	12
	10	138	131	30	303	193	13
	100	97	90	45	241	124	14
	1 000	83	76	60	214	97	18
	10 000	83	62	65	193	76	22
260	0.1	159	152	20	386	283	12
	0.5	131	124	25	338	221	12
	10	90	83	45	255	131	15
	100	76	69	60	228	97	19
	1 000	69	59	70	207	83	21
	10 000	66	48	70	186	69	22
316	0.1	76	69	35	310	186	13
	0.5	69	62	45	269	131	15
	10	48	41	65	241	90	19
	100	45	38	75	221	83	20
	1 000	45	38	80	207	76	21
	10 000	45	38	80	186	69	—
371	0.1	41	34	70	276	117	17
	0.5	38	32	70	—	—	—
	10	34	27	80	—	—	—
	100～10 000	34	27	85	—	—	—

① 标距 50 mm。

2）典型断裂性能见表 2.10-22。

3）蠕变性能见表 2.10-23。

4）其他力学性能　抗剪强度：厚板 T651 状态为 296 MPa；T7351 和 T7651 状态为 269 MPa。压缩强度：以造成 0.1%永久变形为准，厚板 T651 状态为 476 MPa；T7351 状态为 379 MPa；T7651 状态为 414 MPa。支承性能：厚板所有数据是基于 e/d 为 2.0（其中 e 为边距，d 为芯杆直径），T761 状态支承强度 900 MPa，支承屈服强度 730 MPa；T7351 状态支承强度 875 MPa，支承屈服强度 640 MPa；T7651 状态支承强度 925 MPa，支承屈服强度 655 MPa。泊松比为 0.33。拉伸弹性模量 70 GPa；切变模量 27 GPa；压缩弹性模量，73 GPa。疲劳性能：T7351 厚板无切口试样在轴向疲劳试验中经 10^7 次循环，其纵向或横向 205～235 MPa，R = 0.0；其横向为 315 MPa，R = +0.5；165 MPa。

2.5.4 抗蚀性能

一般抗蚀性与 7075 合金相似。T76 和 T7651 状态板材具有良好的抗腐蚀剥落性能，T7351 状态有很好的抗应力腐蚀性能。应注意 T651 状态厚板有较低的抗应力腐蚀性能，在短横向有应力腐蚀敏感性。

表 2.10-22 7475 合金的典型断裂韧度

状态	温度/℃	长横向 /MPa·m^1/2	横长向 /MPa·m^1/2	高长向 /MPa·m^1/2
厚板的 $K_{IC}^{①}$				
T651	20	42.9	37.4	29.7
T7651	20	47.3	38.5	30.8
T7351	20	52.7	41.8	35.2
薄板的 $K_{IC}^{②}$				
T761				
厚 1.2 mm	20	—	143	—
	-54	—	90	—
厚 1.4 mm	20	—	136	—
	-54	—	87	—
厚 1.6 mm	20	—	122	—
	-54	—	102	—
厚 1.6 mm	20	—	150	—
	-54	—	111	—
厚 1.6 mm	20	—	147	—
	-54	—	109	—
厚 1.6 mm	20	—	149	—
	-54	—	125	—

① 用标准紧凑拉伸试样测定的。
② 用带防弯杆的中心开裂的 400 mm×120 mm 的平板试要测定的。

表 2.10-23 厚 1~6.35 mm 的 7475 合金薄板的蠕变断裂性能

温度 /℃	应力施加时间/h	断裂应力 /MPa	蠕变极限/MPa 1.0%	0.5%	0.2%	0.1%
T61 薄板						
24	0.1	552	538	524	517	510
	1	545	531	517	510	503
	10	545	517	510	503	496
	100	538	510	503	496	—
	1 000	524	503	496	—	—
100	0.1	490	476	469	455	448
	1	476	455	448	414	393
	10	455	434	427	414	393
	100	427	414	400	386	365
	1 000	386	379	365	352	—
149	0.1	414	400	393	379	365
	1	386	372	365	345	310
	10	352	338	317	283	241
	100	262	248	241	214	193
	1 000	186	179	179	165	159
T761 薄板						
24	0.1	524	503	483	476	469
	1	517	490	476	469	462
	10	510	483	469	462	462
	100	496	476	469	462	462
	1 000	490	462	462	455	448
100	0.1	441	421	414	414	400
	1	421	407	400	393	379
	10	400	386	386	372	359
	100	379	372	365	352	324
	1 000	359	352	345	324	—

续表 2.10-23

温度 /℃	应力施加时间/h	断裂应力 /MPa	蠕变应力/MPa 1.0%	0.5%	0.2%	0.1%
T761 薄板						
149	0.1	372	365	365	352	324
	1	345	338	331	310	276
	10	310	303	290	255	234
	100	248	234	228	207	193
	1 000	186	179	179	165	159

2.5.5 工艺参数

熔炼铸造工艺与 7075 合金相同，注意控制杂质含量。退火温度 415℃。固溶处理温度，先在 465~477℃保温后再于 515℃保温淬火（分级加热）。时效温度 120~175℃。

2.5.6 主要用途

生产机身用包铝的和不包铝的板材、机翼骨架、桁条等。其他如既要求有高强度又要有好的断裂韧度的零部件。

2.6 7A04 合金

2.6.1 成分和组织

7A04 为 Al-Zn-Mg-Cu 系超高强度铝合金，亦称超硬铝。是超硬铝中相当成熟、使用较久和较广的一个铝合金。

该合金的特点是：强度高，热处理强化效果好，退火和新淬火状态下塑性中等；与硬铝不同，人工时效状态下的抗蚀性比自然时效状态的抗蚀性好，且自然时效进程慢，须经三个月后才能达到时效硬化峰值，故 7A04 合金在淬火人工时效状态下使用。其缺点是组织稳定性不高，低频疲劳强度低，有应力腐蚀开裂倾向。

主要成分（质量分数）为：Zn = 5.0% ~ 7.0%，Mg = 1.8% ~ 2.8%，Cu = 1.4% ~ 2.0%，还加有少量 Mn = 0.2% ~ 0.60%，Cr = 0.10% ~ 0.25%。详细成分见本篇第 1 章表 2.1-15。

主要强化相为 $\eta(MgZn_2)$，$T(Al_2Zn_3Mg_3)$，$S(Al_2CuMg)$。杂质相有 Mg_2Si，$(FeMn)Al_6$，$Al(FeMn)Si$ 等。

2.6.2 物理性能

1）密度（20℃）为 2.85 g/cm^3。

2）热学性能 比热容（100℃）为 920 J/（kg·K）；热导率（25℃）为 155 W/（m·K）；平均线胀系数：-50~20℃时为 $22.0\times10^{-6}\ K^{-1}$，20~100℃时为 $23.1\times10^{-6}\ K^{-1}$，100~200℃时为 $25.1\times10^{-6}\ K^{-1}$。

3）电学性能 电导率（20℃）：T6 状态等体积的为 41%IACS，等质量的为 135%IACS。电阻率（20℃）：T4 状态 42.0 nΩ·m。

2.6.3 力学性能

1）室温力学性能见表 2.10-24。
2）高温力学性能见表 2.10-25。
3）低温力学性能见表 2.10-26。
4）抗扭、抗剪性能见表 2.10-27。
5）持久强度与蠕变强度见表 2.10-28。

2.6.4 焊接性能

7A04 合金焊接裂纹敏感性大，熔焊时极易形成裂纹，焊缝的力学性能和抗应力腐蚀开裂性能也很差，即使进行热处理使强度大部分得到恢复，伸长率仍很低，因此不能熔焊。但在强脉冲电流的作用下还可以接触焊接。

7A04 合金一般用铆接或胶接方法连接。

表 2.10-24 7A04-T6 合金的典型室温力学性能

取样部位	试样方向	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	缺口试样的抗拉强度① σ_b/MPa	伸长率 δ_5/%	断面收缩率 ψ/%
飞机大梁型材						
薄缘板	纵向	640	550	—	11	11
	横向	550	480	—	8.0	7
	高向	560	500	—	9.0	7
厚缘板	纵向	600	520	—	12	19
	横向	570	510	—	7.0	6
	高向	580	510	—	6.5	9
厚缘板中心	纵向	590	530	—	11	15
	横向	500	460	—	3.5	—
	高向	510	470	—	2.6	—
飞机挤压大头型材						
型材部分	纵向	595	545	—	8	15
	横向	—	—	—	—	—
	高向	—	—	—	—	—
端头部分	纵向	620	565	705	8.5	15
	横向	560	515	570	5.5	3.5
	高向	530	—	—	5.0	—
1000 mm × 300 mm × 120 mm 自由锻件						
边缘	纵向	550	490	720	9.5	23
	横向	530	480	610	8.5	18
	高向	530	470	670	4	10
中心	纵向	560	500	740	10.5	21.5
	横向	540	490	680	5.5	12
	高向	520	480	610	3	5
模锻件						
	纵向	610	550	730	10	16
	横向	490	440	550	3.5	8.5
	高向	470	440	550	3	8.5

① 试样带有 0.75 mm 的圆形缺口。

表 2.10-25 7A04-T6 合金的高温力学性能

材料	试验温度 /℃	弹性模量 E/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%
厚度 ≤2.5 mm 的板材	20	67 000	520	440	14
	100	62 000	480	410	14
	125	59 000	470	400	14
	150	56 000	410	350	15
	175	54 000	370	320	16
	200	51 000	280	240	11
	250	47 000	150	120	16
	300	—	85	70	31
飞机梁型材	20	72 000	600	550	6
	100	64 500	530	500	8
	125	63 500	520	490	5
	150	61 500	430	400	7
	200	57 500	330	310	4
	250	49 000	160	150	16
	300	43 500	100	80	23

表 2.10-26 7A04 合金型材的低温力学性能

温度 /℃	状态	截面 /mm	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ_5/%	断面收缩率 ψ/%	冲击韧度 a_{KU}/kJ·m^{-2}
20	T6	65×6.7	630	10	15	98.1
-40			660	8	13	98.1
-70			660	8	14	98.1
-196			800	7	9	98.1

表 2.10-27 7A04-T6 合金大梁型材的高温抗扭、抗剪性能

温度 /℃	切变模量 G/MPa	抗扭强度 τ_b/MPa	抗扭屈服强度 $\tau_{0.3}$/MPa	抗扭比例极限 τ_p/MPa	抗剪强度 τ/MPa
20	27 000	435	310	235	325
100	24 000	405	290	225	320
150	22 500	355	265	210	280
200	20 000	275	220	165	220
250	15 000	130	120	60	110
300	11 500	70	55	40	70

表 2.10-28 7A04-T6 合金拉制棒材的持久强度与蠕变强度 MPa

温度/℃	σ_1	σ_{10}	σ_{100}	σ_{1000}
105	497	476	441	392
150	399	343	259	161
205	—	133	98	67
315	—	—	31	24
温度/℃	$\sigma_{0.1/1}$	$\sigma_{0.1/10}$	$\sigma_{0.1/100}$	$\sigma_{0.1/1000}$
105	—	—	—	—
150	—	—	—	—
205	84	69	—	—
315	29	—	—	—
温度/℃	$\sigma_{0.2/1}$	$\sigma_{0.2/10}$	$\sigma_{0.2/100}$	$\sigma_{0.2/1000}$
105	—	—	—	—
150	—	—	—	—
205	112	84	66	—
315	35	27	—	—
温度/℃	$\sigma_{0.5/1}$	$\sigma_{0.5/10}$	$\sigma_{0.5/100}$	$\sigma_{0.5/1000}$
105	—	—	—	—
150	266	245	189	140
205	126	112	84	—
315	—	31	23	—
温度/℃	$\sigma_{1.0/1}$	$\sigma_{1.0/10}$	$\sigma_{1.0/100}$	$\sigma_{1.0/1000}$
105	441	413	492	364
150	350	308	245	154
205	133	119	91	65
315	—	34	26	19

2.6.5　抗蚀性能

7A04合金一般抗蚀性尚好，但抗应力腐蚀开裂性能差。喷丸处理以减小表面拉应力，包铝、分级时效、形变热处理等对减小应力腐蚀开裂倾向性有利。

2.6.6　工艺参数

熔炼温度720～750℃，铸造温度715～730℃。轧制温度370～410℃，锻造温度380～450℃，挤压温度300～450℃。退火温度360～420℃，退火冷却速度小于30℃/h，缓冷至150℃然后空冷。固溶处理温度470℃±5℃，淬火转移时间不应超过15 s，否则将导致过饱和固溶体分解。淬火后的停留时间对以后人工时效效果有影响，要求淬火后4 h以内或48 h以后进行人工时效，否则强度会下降。7A04合金人工时效规程：

单级时效：120～125℃，24 h，或135～145℃，16 h。

分级时效：120℃±5℃，3 h；160℃±5℃，3 h。

7A04合金由于自然时效状态抗蚀性差，且时效过程长达三个月以上，所以不采用自然时效。

2.6.7　主要用途

半成品有板、管、棒、型材和锻件。

7A04合金是超硬铝中应用最广的一个合金。主要用于航空工业，飞机结构中受力元件，如大梁、桁条、隔框、蒙皮、起落架等。

编写：陈康华（中南大学）
贺奉嘉（中南大学）
审稿：唐仁政（中南大学）

第 11 章　新型变形铝合金

锂（Li）在铝合金中的作用，很早就引起人们注意，不停地开展研究工作，目前已有长足的发展，无论在国际标准中或者在我国国家标准中都有正规牌号列入。

20 世纪 70 年代发现，钪（Sc）对铝合金性能的改善具有“神奇”的作用，添加微量（0.15%～0.25%）Sc 不仅能大幅度提高铝合金的强度，还能保持合金的塑性，同时还显著改善其冷-热加工性能以及抗腐蚀性和可焊性，因此受到了极大的关注。

近些年，美国铝业公司（Alcoa）研制的几种 Al-Fe-X 系耐热铝合金，利用快速凝固方法制备合金产品，性能优越，是铝合金新品种的又一发展。

1　Al-Li 系铝合金[❶]

1.1　概述

Li 在 Al 中最大溶解度为 4.2%，Al 和 Li 形成 AlLi 化合物，AlLi 化合物在固态下的溶解度随温度而改变。同其他热处理强化的变形铝合金一样，Al-Li 合金的强化也是通过固溶处理的随后人工时效获得的。

Li 的密度仅为 0.54 $g \cdot cm^{-3}$，是减小铝合金密度最佳元素。向铝合金中每添加 1%Li，可使铝合金密度下降约 3%，而弹性模量 E 则上升约 5%，这是制造航空航天飞行器的科学家最感兴趣的。

Al-Li 合金或含 Li 的铝合金生产有一定难度，因此成熟得较晚，发展得较慢。

1.2　合金各论

1.2.1　8090 合金

（1）成分和产品

8090 合金是一种中等强度的铝-锂-铜-镁合金，其密度比 2024、7075 合金的低 10%，而其弹性模量则比这二者的高 10%。它可用于既要求耐损伤又要求低密度的场合。但是其产品牌号状态尚未在国际铝业协会注册。常用的未经正式注册的状态代号列于表 2.11-1 中。

化学成分（按 GB/T 3190—1996）见表 2.11-2。

（2）物理性能

1）热性能

① 热导率　25℃时的热导率为 93.5 W/（m·K）。

② 比热容　不同温度下的比热容见表 2.11-3。

表 2.11-1　8090 合金的产品及状态代号

产品	状态	特征
薄板	T8、T8X	接近峰值的状态，中等强度
薄板	T81	欠时效，耐损伤
厚板	T8771、T651、T7E20	近峰值时效
厚板	T8151、T8E57	欠时效，耐损伤
挤压板	T6511、T8511/10	峰值时效，中等强度到高强度
锻件	T8771、T852	峰值时效，中等强度

表 2.11-2　化学成分　%

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Li	Zr	Ti	其他		Al
										单个	合计	
0.20	0.30	1.0～1.6	0.10	0.6～1.3	0.10	0.25	2.2～2.7	0.04～0.16	0.10	≤0.05	≤0.15	余量

表 2.11-3　比热容

温度/℃	-150	-100	-50	0	40	150	250
c/J·（kg·K）$^{-1}$	542	814	886	992	957	1 160	1 290

③ 线胀系数　20～100℃的平均线胀系数为 214×10^{-6} K^{-1}。

2）密度 ρ　20℃时为 2.53 g/cm^3。

3）熔化温度　为 600～655℃。

4）电性能　电导率 17%～19%IACS。

5）磁性能　无磁性。

（3）力学性能

1）拉伸性能与断裂韧度　8090 合金各种拉伸性能与断裂韧度见表 2.11-4～表 2.11-8。

表 2.11-4　8090 合金的拉伸性能与断裂韧度

状态	产品	组织①	最低或典型拉伸性能②				最低或典型断裂韧度	
			方向	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ（50 mm）/%	断裂方向及韧性类型（K_C 或 K_{IC}）③	断裂韧度②/MPa·$m^{1/2}$
8090-T81（欠时效）	耐损伤未包铝薄板＜3.55 mm	R	纵向	295～350	345～440	8～10typ	L-T（K_C）	94～145
			横向	290～325	385～450	10～12	T-L（K_C）	85 min
			45°方向	265～340	380～435	14typ	S-L（K_C）	—
8090-T8×（峰值时效）	中等强度薄板	UR	纵向	380～425	470～490	4～5	L-T（K_C）	75typ
			长横向	350～440	450～485	4～7	T-L（K_C）	—
			45°方向	305～345	380～415	4～11	S-L（K_C）	—
8090-T8×	中等强度薄板	R	纵向	325～385	420～455	4～8	L-T（K_C）	—
			长横向	325～360	420～440	4～8	T-L（K_C）	—
			45°方向	325～340	420～425	4～10	S-L（K_C）	—

❶ Al-Li 系铝合金为郑子樵编写。

续表 2.11-4

状态	产品	组织①	最低或典型拉伸性能②				最低或典型断裂韧度	
			方向	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ (50 mm) /%	断裂方向及韧性类型 (K_C 或 K_{IC})③	断裂韧度② /MPa·m$^{1/2}$
8090-T8771 > T651 (峰值时效)	中等强度薄板	UR	纵向	380 ~ 450	460 ~ 515	4 ~ 6	L-T (K_C)	20 ~ 35
			长横向	365 min	435 min	4 min	T-L (K_C)	13 ~ 30
			短横向	360typ	465typ	— 420 min	S-L (K_C)	16typ
			45°方向	340 min	420 min	1 ~ 1.5 min	—	—
8090-T8151 (欠时效)	耐损伤厚板	UR	纵向	345 ~ 370	435 ~ 450	5 min	L-T (K_C)	35 ~ 49
			长横向	325 min	435 min	5 min	T-L (K_C)	30 ~ 44
			45°方向	275 min	425 min	8 min	S-L (K_C)	25typ
8090-T852	经冷加工的模锻件，自由锻件	UR	纵向	340 ~ 415	425 ~ 495	4 ~ 8	L-T (K_C)	30typ
			长横向	325 ~ 395	405 ~ 475	3 ~ 6	T-L (K_C)	20typ
			45°方向	305 ~ 395	405 ~ 450	2 ~ 6	S-L (K_C)	15typ
8090-T8511，T6511	挤压材	UR	纵向	395 ~ 450	460 ~ 510	3 ~ 6	—	—

① R 为再结晶，UR 为非再结晶。
② 除标有"min (最小的)"与"typ (典型的)"的值外，有两个数字的代表最小值与典型值。最小值供顾客用，并可视为国家标准，但并不代表注册值。
③ K_C 为平面应力断裂韧度；K_{IC}为平面应变断裂韧度。

表 2.11-5 国产 11 mm 挤压带板在 T8510 状态及其经不同稳定化处理后的室温拉伸性能

稳定化条件		σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%
温度/℃	时间/h			
室温	—	515	441	5.7
100	50	542	471	4.6
125	50	540	471	4.6
150	50	562	488	5.8
175	50	526	459	7.0
200	50	406	321	8.4
250	50	275	151	11.1
—	—	—	—	—

表 2.11-6 国产 8090T 8510 11 mm 挤压带板经不同稳定化处理后的高温拉伸性能

稳定化及试验温度/℃	稳定化时间 /h	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%
100	50	509	336	8.9
125	50	479	363	12.1
150	50	450	339	17.1
175	50	374	288	23.4
200	50	241	191	36.3
250	50	99	70	60.6

表 2.11-7 8090-T3 合金的低温力学性能

温度 /K	方向	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ(38 mm) /%	面缩率 ψ/%	断裂韧度 K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$
295	纵向	217	326	12	18	—
	横向	208	348	14	26	—
76	纵向	248	458	22	27	88①
	横向	241	450	20	37	55②
20	纵向	272	609	28	28	—
	横向	268	592	25	27	—
4	纵向	280	605	26	28	67①
	横向	270	597	25	29	45②

① L-T 裂纹方向（裂纹平面及增长方向垂直于轧制方向）的韧度。
② T-L 裂纹方向（裂纹平面及增长方向平行于轧制方向）的韧度。

表 2.11-8 8090-T6 合金焊件的拉伸性能

合金	焊丝	热处理	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ(50 mm) /%
未焊的	—	—	429	504	6
8090-T6	Al	焊接状态	137	165	5
8090-T6	Al-5Si	焊接状态	165	205	3
8090-T6	Al-5Mg	焊接状态	176	228	4
7017-T6	Al-5Mg	自然时效 30 d	220	340	8
8090-T6	Al-5Mg-Zr	焊接状态	183	235	4
8090-T6	8090	焊接状态	285	310	2
8090-T6	8090	焊接状态 + T6 状态	315	367	4
2219-T851	2319	焊接状态	185	300	5

2）疲劳性能　在应力比为 0.1 时，8090-T81 合金薄板的疲劳裂纹增长速度比 2024-T3 合金的低 1 个数量级。不过，在应力比大时，这种优势就会丧失。8090-T81 合金的光滑疲劳强度与切口疲劳强度都比 2024 合金的相应性能高。显微组织对 8090 合金的疲劳寿命也有影响，具有拉长的再结晶组织的板材有最长的寿命。8090 合金的疲劳性能与薄板的这种性能相当。该合金厚板的疲劳裂纹增长速度比 2024 合金的低，而且光滑试样与缺口试样都具有比 2024 合金更高的疲劳应力。

3）缺口拉伸性能　挤压带板在 T8510 状态下的室温缺口拉伸性能见表 2.11-9。

(4) 耐蚀性能

8090 合金的腐蚀性能与人工时效程度及显微组织结构的关系极为密切，在大气中有良好的抗剥落腐蚀性能。峰值时效的厚板在短-横向上有最高的抗应力腐蚀开裂能力，非再结晶的厚板在长-横向上有最高的抗应力腐蚀开裂性能，再结晶厚板抗应力腐蚀开裂阈值较低。在评定 8090 合金抗剥落腐蚀性能时，最好采用 ASTM 改进的醋酸加速的间歇式喷雾试验法（MASTMAASIS）。不同状态的剥落腐蚀和应力腐蚀开裂（SCC）实验结果见表 2.11-10。

(5) 熔铸与热处理制度

在熔炼铸造时易氧化、烧损，成分不易控制，氧化物不

表 2.11-9 缺口拉伸性能

试样厚度 /mm	方向	K_t	抗拉强度 σ_b/MPa	非比例伸长应力 $\sigma_{p0.2}$/MPa	缺口抗拉强度 σ_{bH}/MPa	$\frac{\sigma_b-\sigma_{bH}}{\sigma_b}$/%	$\sigma_{bH}/\sigma_{p0.2}$
1.0	纵向	5	543	510	683	-25.8	1.34
3.5		3	515	441	514	0.2	1.17
3.5		4	515	441	511	0.78	1.16
3.5		5	515	441	497	3.5	1.13

表 2.11-10 8090 合金的剥落腐蚀与 SCC 实验结果

状态	产品	显微组织	剥落腐蚀等级①			SCC 阈值
			EXCO② 试验	MASTMA-ASIS 试验③	大气试验	
8090-T81（欠时效）	薄板	再结晶	EA	EA	P，EA	长横方向的为 60% $\sigma_{0.2}$
8090-T8（峰值时效）	薄板	再结晶	ED	EA	P	—
8090-T8510、T8511（峰值时效）	挤压材	非再结晶	—	—	—	长横方向的为 75% $\sigma_{0.2}$
8090-T8771、T651（峰值时效）	厚板	非再结晶	表面 P	—	表面 P	短横向阈值 105～140 MPa
8090-T851	厚板	非再结晶	EC④	EB④	P，EA	—
8090-T8（峰值时效）	薄板	非再结晶	EC	EB	—	长横方向的为 75% $\sigma_{0.2}$
8090（峰值时效）	锻件	非再结晶	—	—	—	短横向阈值 140 MPa

① 按 ASTM G34 进行试验：P 为点蚀；EA 为表面腐蚀，有细微孔、薄碎片、小片或粉末，仅有轻微成层现象；EB 为中等腐蚀，成层明显，并深入金属内部；ED 为严重腐蚀，深入金属内部，并有金属损失。

② 按 ASTM G34 进行试验。

③ MASTMAASIS：以醋酸改型的盐雾 ASTM 间歇试验。

④ 在 $T/2$ 平面处，T 为板厚。

易消除，易吸氢。因此，欲获得优质的半成品——板带材、挤压材与锻件，必须严格控制铸锭品质，特别应控制夹杂物、杂质、氢含量、晶粒尺寸与成分。锂的化学活性甚高，会与常用熔炼铝合金的耐火材料发生反应，生成非金属化合物，进入熔体中，形成夹杂物，降低材料塑性。因此，在熔炼铝锂合金时，应特别注意耐火材料的选择。

8090 合金挤压棒材的固溶处理温度为 530℃，应尽可能快地加热到淬火温度，温度偏差不得超过 ±6℃；材料出炉应尽可能地快，将转移时间缩至最短。人工时效处理制度为 190℃，12 h。

8090 合金在热状态下具有较高的塑性，可以在 450～380℃锻造，在 480～420℃挤压和在 500～250℃轧制。合金在固溶状态有好的成形性能，弯曲半径可达板厚的 2 倍，弯曲回弹角比常规高强度铝合金的约小 2°，而方向性在 >45°后的 8090 合金薄板的回弹角则显著增大。

(6) 选用实例

国外有选择地应用于飞机结构件上。

1.2.2 2090 合金

(1) 成分和产品

2090 合金由美国研制，但未形成工业规格产品。研制目标是：抗拉强度与 7075-T6 合金相当，而其密度应低 8%，弹性模量应高 10%。2090 合金用于生产高强度与中等强度的板材和挤压材料，它有优良的可焊性与低温力学性能，有很强的抗疲劳裂纹增长能力，但拉伸性能的各向异性较大。2090 合金的状态与产品形式见表 2.11-11 所示。

表 2.11-11 2090 合金的状态与产品形式

状态	产品	特 点
O	板材	强度最低，成形性最佳
T31	薄板、挤压材	成形性良好，用户时效后可获得与 T83、T84 状态相当的性能
T3	薄板、挤压材	成形性中等，可由用户时效至 T83 及 T84 状态
T86	挤压材	与 7075-T6511 的强度相当
T83	薄板	与 7075-T6 材料的强度相当
T81	厚板	与 7075-T651 材料的强度相当
T84	板材	强度、韧度与 7075-T76 材料的相当
T6	板材	用户进行固溶处理与人工时效

在美国铝业协会注册的 2090 合金化学成分见表 2.11-12。

表 2.11-12 2090 合金化学成分 %

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Li	Zr	Ti	其他		Al
										单个	合计	
0.10	0.12	2.4～3.0	0.05	0.25	0.05	0.10	1.9～2.6	0.08～0.15	0.15	≤0.05	≤0.15	余量

(2) 物理性能

1) 热性能

① 热导率 25℃时的热导率为 84~92.3 W/(m·K)。

② 比热容 100℃时的比热容为 1 203 J/(kg·K)。

③ 线胀系数 20~100℃的平均线胀系数为 23.6×10^{-6} K^{-1}。

2) 密度(20℃)为 2.59 g/cm^3。

3) 电性能 电导率 17%~19%IACS。

4) 磁性能 无磁性。

(3) 力学性能

不同状态的 2090 合金力学性能见表 2.11-13。

(4) 耐腐蚀性能

2090 合金对海洋性气候的抗剥落腐蚀应力比 7075-T76 合金的高;人工时效对合金的抗应力腐蚀开裂(SCC)的能力有很大的影响,欠时效(T84)状态材料对 SCC 的敏感性比 T83、TU3、T86 状态材料的大得多;2090 合金的点腐蚀比 7075 合金的稍大一些。2090 合金的一系列耐腐蚀性能数据见表 2.11-14~表 2.11-17。

表 2.11-13 2090 合金的暂定力学性能

产品与状态	厚度/mm	标 准	拉伸性能				韧性	
			方向①	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ(50 mm)/%	方向②与 K_C 或 K_{IC}③	K_{IC}或 K_C/MPa·$m^{1/2}$
T83 薄板	0.8~3.175	AMS4351	纵向 长横向 45°	517 (517) 503 440	530 (550) 505 440	3 (6) 5 —	L-T (K_C) — —	(44)④
T83 薄板	3.2~6.32	AMS4351	纵向 长横向 45°	483 455 385	4 5 —	— — —	— — —	
T84 薄板	0.8~6.32	AMS Draft D 89	纵向 长横向 45°	455 (470) 415 345	495 (525) 475 427	3 (5) 5 7	L-T (K_C) T-L (K_C) —	49 (71)④ 49④ —
T3 薄板⑤ O 薄板 7075-T6 薄板	— — —	⑥ ⑥ —	长横向 长横向 纵向	214 mm 193max (517)	317 min 213max (570)	6 min 11 min (11)	— — L-T (K_C)	— — (71)④
T86⑦挤压材	0.0~3.15⑧ 3.175~6.32⑧ 6.35~12.65⑧	AMS Draft D 88 BE	纵向 纵向 长横向	470 510 517 483	517 545 550 525	4 4 5 —	— — — —	— — — —
7075-T7 厚板- T81 厚板	13~38	AMS 4346	纵向 纵向 长横向	(510) 483 (517) 470	(565) 517 (550) 517	(11) 4 (8) 3	L-T (K_{IC}) L-T (K_{IC}) L-T (K_{IC})	(27) ≥27 (11) ≥22

① L 表示纵向;LT 表示长横向。

② L-T 表示裂纹平面与方向垂直于轧制或挤压方向;T-L 表示裂纹平面与方向平行于轧制或挤压方向。

③ K_C 表示平面应力断裂韧性;K_{IC}表示平面应变断裂韧性。

④ 405 mm×1 120 mm 薄板的断裂韧度是根据有限的数据与典型值获得的。

⑤ T3 状态可时效到 T83 或 T84 状态。

⑥ 无最终用户规范。

⑦ 向美国铝业协会(AA)注册。

⑧ 标定直径或最小厚度(棒材、线材、型材)或标定壁厚(管材)。

表 2.11-14 2090-T83 薄板、2090-T81 厚板、2090-T86 挤压材的剥落腐蚀性能

产品	材料来源	厚度/mm	平面位置①	等 级②					产品	材料来源	厚度/mm	平面位置①	等 级②				
				盐雾试验③			海岸④						盐雾试验③			海岸④	
				7 d	14 d	28 d	时间/月	等级					7 d	14 d	28 d	时间/月	等级
薄板	工厂	1.6	—	—	—	P	③	③									
厚板	工厂	2.3	T/2	P	P	P	24	N			6.4	T/2	P	P	P	48	N
			T/10	P	P	P	24	N			6.4	T/2	P	P	P	48	N
挤压材	工厂	2.0	T/2	N	P	P	24	N			25	T/2	P	P	P	48	EA
			T/10	P	P	P	24	N			25	T/2	P	P	P	48	EA
厚板	实验室	6.4	T/2	P	P	P	48	N			25	T/2	P	P	P	48	EA
		6.4	T/2	P	P	P	48	N			25	T/2	P	P	P	48	EA

① T 为材料厚度,T/2、T/10 为位置。

② 按 ASTM G 34 进行试验:N 为无明显腐蚀;P 为点腐蚀;EA 为表层腐蚀,表面上有小孔、薄片、粉末,但分层金属极少。

③ 改型的 ASTM 间歇乙酸盐雾加速试验。

④ 海岸暴露试验地在罗德艾兰州朱迪斯角(Point Judith,RI)。

表 2.11-15　2090 合金及 7075 合金的点腐蚀

合金	厚度/mm	试验时间	点蚀最大深度/μm	平均点蚀深度/μm	点蚀密度/点数·mm^{-1}
交替沉浸于 3.5%NaCl 溶液，ASTM G44					
7075-T6	1.3	30 d	19.6	79.2	14.8
7075-T83	1.3	30 d	198.1	123.4	12.9
	1.6	30 d	193.5	107.4	5.8
中性，5%盐雾试验，ASTM B 117					
7075-T6	1.3	1 000 h	20.5	16.8	6.2
	1.3	1 000 h	24.6	20.3	3.8
2090-T83	1.0	1 000 h	182.9	116.8	4.9
	1.3	1 000 h	209.0	65.3	4.3
	1.6	1 000 h	198.1	101.6	4.8

表 2.11-16　2090 合金及其他合金腐蚀电位

合金	腐蚀电位/mV	合金	腐蚀电位/mV
2024-T3	-600	2090-T83	-740
2090-T3	-640	2090-T86	-740
2090-T84	-710	7075-T6	-740
2024-T81	-710	1100	-745

(5) 工艺性能及要求

2090 合金在拉伸-弯曲试验时，其成形性与 2024、7075 合金相比较，按下列是次序递减，2024-T3、2090-O、2090-T31、2090-T3、7075-T6、2090-T83。2090-T31、T83 材料的蚀洗性能与 2024-T3、7075-T6 相当，其阳极氧化性能介于 2024 及 7075 合金之间。

2090 合金厚板的机械加工性能比 2024-T351、7075-T651 合金的好。有良好的熔化极气体保护焊、钨极气体保护电弧焊和电子束焊性能。

表 2.11-17　2090-T81 厚板及 2090-T86 挤压材的短-横向应力腐蚀开裂性能

产品	材料来源	厚度/mm	试样①	交替沉浸 30 d				海岸④			
				172 MPa		241 MPa		172 MPa		241 MPa	
				F/N②	天数③	F/N②	天数③	F/N②	天数③	F/N②	天数③
厚板	试验室	25	C形	0/3	—	3/3	3，3，5	0/3	—	2/3	367，367
		25	C形	0/3	—	3/3	9	0/3	—	1/3	966
		25	C形	1/3	5	3/3	3，3，3	0/3	—	3/3	367，839，966
		25	C形	0/3	—	3/3	3，9，9	0/3	—	0/3	—
厚板	工厂	38	拉伸棒	0/5	—	3/5	9，12，14	—	—	—	—
挤压材	工厂	20	C形	0/5	—	0/5	—	0/5	⑤	0/5	⑤

① C形试样直径为 19 mm，拉伸棒直径为 3.2 mm。② 开裂试样/试样总数。③ 出现开裂天数。④ 海岸试验在罗得艾兰州朱迪斯角。⑤ 在朱迪斯角暴露 1 000 d。

(6) 选用实例

可用于航空航天器的结构材料，部分取代 7075 合金。

1.2.3　2091 合金

(1) 成分和产品

2091 合金由法国普基铝业公司（Pechiney）研制，1985 年在美国铝业协会注册。我国曾在实验室规模研究仿制，但未生产工业规模产品。2901 合金的密度比 2024 合金的低 8%，弹性模量则高 7%，而其他性能与 2×××及 7×××系合金的相当。2901 合金的显微组织决定于材料厚度与生产企业。一般，厚度大于 3.5 mm 的材料具有非再结晶组织，而薄板材的则为拉长的再结晶组织。其产品及状态见表 2.11-18。

表 2.11-18　未包铝的及包铝的 2091 合金的状态与产品

状态	特　点	产品种类
O	退火的，强度最低，成型性最佳	板材
T3	固溶处理与拉伸，可时效至 T84	板材
T8、T84	欠时效状态，强度、韧性与抗蚀性达到最优化，可用于制造耐损伤结构件	薄板
T851	中等强度	厚板
T8×51	欠时效状态，耐损伤	板材

化学成分见表 2.11-19。

表 2.11-19　2091 合金化学成分　%

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Li	Zr	Ti	其他		Al
										单个	合计	
0.20	0.30	1.8~2.5	0.10	1.1~1.9	0.10	0.25	1.7~2.3	0.04~0.16	0.10	≤0.05	≤0.15	余量

(2) 物理性能

1) 热性能

① 热导率　25℃时的热导率为 84 W/(m·K)。

② 比热容　100℃时的比热容为 860 J/(kg·K)。

③ 线胀系数　20~100℃的平均线胀系数为 23.9×10^{-6} K^{-1}。

2) 密度（20℃）为 2.58 g/cm^3。

3) 电性能　电导率 17%~19 %IACS。

4) 磁性能　无磁性。

(3) 力学性能

2091 合金拉伸力学性能见表 2.11-20。

表 2.11-20 欧洲暂行标准（prEN）中规定的 2091 合金薄板及中厚板的最低力学性能

板厚/mm	纵向性能			长横向性能			45°方向性能		
	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%
包铝的（prEN 6003）									
0.79～3.45	265	364	10	265	384	10	236	350	15
3.45～6.0	334	418	8	290	418	10	256	364	15
未包铝的（prEN 6006）									
0.81～3.3	290	394	10	295	408	10	265	379	15
3.3～6.0	359	448	8	325	359	10	285	398	15
6.0～12	359	448	8	325	359	10	285	398	15
12～40	354	438	7	320	423	8	275	394	13

（4）耐蚀性能

2091 合金 T84 状态的剥落腐蚀性能与 2024-T3 合金的这种性能相当，主要取决于材料的显微组织与淬火速度。非再结晶程度越大，剥落腐蚀越均匀。而 2091 合金薄板的应力腐蚀开裂能力与显微组织的关系则与上述的关系相反，纤维状组织越多，应力腐蚀开裂阈值就越高。当材料具有较粗的非再结晶组织和较细的、伸长的再结晶组织时，其应力腐蚀开裂阈值可达 240 MPa。薄板材的 SCC 阈值决定于材料的厚度与生产企业，低的为 $\sigma_{0.2}$ 的 50%～60%，而高的可达 $\sigma_{0.2}$ 的 75%。剥落腐蚀情况见表 2.11-21。

表 2.11-21 2091 合金的海洋气氛剥落腐蚀性能与剥落腐蚀试验

产品	厚度/mm	状态	平面	EXCO①试验 4*d* 的剥落腐蚀等级②	海洋气氛试验③	
					月	剥落等级②
薄板④	1.0～3.5	—	T/2	EA（表层）	—	—
薄板⑤	6.3	T8	T/2	EB（中等）	6	EB（中等）⑥
薄板⑤	3.2	T3	T/2	EB（中等）	12	P（点蚀）
薄板⑦	3.2	T8	T/2	EB（中等）	12	EB（中等）
薄板⑤	4.8	T8	T/2	EA（表层）	—	—
		T8	T/10	EA（表层）	—	—
薄板⑦	1.2	T3	T/2	P（点蚀）	—	—
厚板⑤	12.7	T8	T/2	EA（表层）	—	—

① 按 ASTM G34 进行剥落腐蚀试验（EXCO）。
② 根据 ASTM G34，剥落腐蚀等级为：P 为点蚀；EA 为表面腐蚀，有轻微的成层，表面上有小孔、小片或粉末；EB（中等）为分层明显，并深入内部。
③ 实验地点为罗得艾兰州朱迪斯角。
④ 普基公司（Pechiney）。
⑤ 美国铝业公司达文波特厂生产。
⑥ 海岸试验出现成层的时间比试验室的早。
⑦ Fokker 的数据。

（5）熔铸工艺与热处理制度

在熔炼铸造时易氧化、烧损，成分不易控制，氧化物不易消除，易吸氢。因此，欲获得优质的半成品——板带材、挤压材与锻件，必须严格控制铸锭品质，特别应控制夹杂物、杂质、氢含量、晶粒尺寸与成分。同时，在熔炼铝锂合金时，应特别注意耐火材料的选择。

2091 合金薄板的固溶温度为 530℃，人工时效制度为 120℃，24 h；2091 合金挤压棒材的固溶温度为 530℃，人工时效制度为 190℃，12 h。

退火状态的 2091 合金薄板成型性高于 2024 合金，化学铣削及表面处理性能与 2024、7075 合金相当。

（6）选用实例

可用于飞机机身桁条、蒙皮和导弹壳体等结构件。

1.2.4 5A90 合金

（1）成分和产品

5A90 合金属于中强可焊铝锂合金。5A90 合金具有密度小、强度适中，可焊性和耐蚀性好等特点。

化学成分见表 2.11-22。

表 2.11-22 5A90 合金化学成分 %

Fe	Si	Cu	Mg	Ti	Zr	Li	Be	Al
≤0.12	≤0.09	≤0.05	4.9～5.4	≤0.05	0.08～0.13	1.8～2.2	—	余量

（2）物理性能

1）热性能

① 比热容 见表 2.11-23。

表 2.11-23 5A90 合金不同温度下的比热容

温度/℃	100	120	200
比热容/J·(kg·K)$^{-1}$	1 043.8	1 074.0	1 238.3

② 线胀系数 20～100℃的平均线胀系数为 23.86×10^{-6} K^{-1}。

2）密度（20℃）为 2.48 g/cm^3。

3）电性能 电导率 9.1×10^4 Ω/cm。

4）磁性能 无磁性。

（3）力学性能

1）拉伸性能 5A90 合金各种规格的板材及型材的拉伸性能分别见表 2.11-24 和表 2.11-25。

2）疲劳性能见表 2.11-26。

（4）耐蚀性能

按照 HB5255 标准的方法进行测试，合金有轻微的晶间腐蚀；按照 HB 5455—1990 标准方法测试剥落腐蚀，在材料原表面状况下试验未发现剥蚀现象。

（5）工艺参数

5A90 合金固溶处理在盐浴炉中进行，盐浴加热温度为 450℃±10℃，保温时间依成品板材厚度定，淬火转移时间小于 30 s，室温水淬。时效处理制度为 120℃，5～10 h。

（6）选用实例

可用于飞机蒙皮和航天器的结构材料。

表 2.11-24　5A90 合金几种规格板材的拉伸性能

规格	拉伸性能					
	横向			纵向		
	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_{10}/%	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%
δ1.2	448 ~ 454	265 ~ 274	15.7 ~ 18.0	452 ~ 463	273 ~ 280	10.8 ~ 11.6
δ1.5	452 ~ 458	271 ~ 279	18.8 ~ 20.0	456 ~ 468	257 ~ 270	13.8 ~ 15.2
δ2.5	482 ~ 484	302 ~ 304	15.3 ~ 18.2	457 ~ 468	262 ~ 296	8.1 ~ 10.7
δ3.0	477 ~ 487	310 ~ 315	15.0 ~ 16.9	460 ~ 470	301 ~ 307	6.8 ~ 7.8

表 2.11-25　5A90 合金型材的拉伸性能

材料	拉伸性能		
	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%
5A90	448 ~ 458	279 ~ 290	15.5 ~ 16.7

表 2.11-26　5A90 合金的疲劳性能

试验合金	试验参数	疲劳极限/MPa
5A90 型材	$Kt=1$，$R=0.1$，$f=120$ Hz	141.79
	$Kt=3$，$R=0.1$，$f=120$ Hz	98.7

2　Al-Sc 系铝合金

2.1　概述

用微量钪（质量分数为 0.07% ~ 0.35%）合金化的铝合金称为铝钪合金或含钪铝合金。与不含钪的同类合金相比，铝钪合金强度高、塑韧性好、耐蚀性能和焊接性能优异，是继铝锂合金之后新一代航天、航空、舰船用轻质结构材料。20 世纪 70 年代以后，俄罗斯科学院巴依科夫冶金研究院和全俄轻合金研究院相继对钪在铝合金中的存在形式和作用机制进行了系统的研究，开发了 Al-Mg-Sc、Al-Zn-Mg-Sc、Al-Zn-Mg-Cu-Sc、Al-Mg-Li-Sc 和 Al-Cu-Li-Sc 五个系列 17 个牌号的铝钪合金，产品主要瞄准航天、航空、舰船的焊接荷重结构件以及碱性腐蚀介质环境用铝合金管材、铁路油罐、高速列车关键结构件等。

2.2　合金各论

2.1.1　Al-Mg-Sc 系合金

在俄罗斯，这个系的合金有以下七个牌号：01570、01571、01545、01545K、01535、01523 和 01515。这些合金除 Mg 含量不同外，都是用 Sc 和 Zr 微合金化的铝镁系合金。此外，合金中还添加有微量的 Mn 和 Ti 等。表 2.11-27 列出了 Al-Mg-Sc 系合金热加工态或退火态的拉伸力学性能。在我国，航天和舰船用铝镁钪系合金板材和焊丝已经列入"十五"攻关计划。

表 2.11-27　Al-Mg 和 Al-Mg-Sc 合金成分和半成品力学性能

合金系	合金牌号	主要合金元素平均含量 /%	热加工或退火态力学性能		
			σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%
Al-Mg	AMg1	Al-1.15Mg	120	50	28
Al-Mg-Sc	01515	Al-1.15Mg-0.4Mn-0.4（Sc + Zr）	250	160	16
Al-Mg	AMg2	Al-2.2Mg-0.4Mn	190	90	23
Al-Mg-Sc	01523	Al-2.1Mg-0.4Mn-0.45（Sc + Zr）	270	200	16
Al-Mg	AMg4	Al-4.2Mg-0.65Mn-0.06Ti	270	140	23
Al-Mg-Sc	01535	Al-4.2Mg-0.4Mn-0.4（Sc + Zr）	360	280	20
Al-Mg	AMg5	Al-5.3Mg-0.55Mn-0.06Ti	300	170	20
Al-Mg-Sc	01545	Al-5.2Mg-0.4Mn-0.4（Sc + Zr）	380	290	16
Al-Mg	AMg6	Al-6.3Mg-0.65Mn-0.06Ti	340	180	20
Al-Mg-Sc	01570	Al-5.8Mg-0.55（Sc + Cr + Zr）	400	300	15

（1）01570 合金

这种合金 Mg 含量为 5.3% ~ 6.3%，Mn 含量为 0.2% ~ 0.6%，Sc 含量为 0.17% ~ 0.35%，Ti 含量为 0.01% ~ 0.05%。合金的熔炼和铸造可以采用传统的熔炼-半连续激冷铸造方式，微量钪采用 Al-Sc 中间合金的形式加入，铸锭需经均匀化处理。合金铸锭均匀化后经热轧、热挤或热锻成材，热轧板材冷轧后需经退火处理，以增强抗剥落腐蚀和抗应力腐蚀的能力。

01570 合金在很宽的温度（440 ~ 500℃）和应变速率（10^{-4} ~ 10^{-1} s^{-1}）范围内，具有天然的超塑性。表 2.11-28 列举了 01570 合金在不同试验温度下的超塑性。

表 2.11-28　01570 合金板材的超塑性（板厚 0.8 mm）

试验温度/℃	$\varepsilon'=7.2\times10^{-3}$ s^{-1}时的超塑性指标		
	δ/%	$\sigma_{0.2}$/MPa	m
400	320	21	0.33
425	380	17.5	0.38
450	480	12.5	0.47
475	730	10	0.6
500	850	8	0.53
525	670	6	—

01570 合金的焊接性能非常好，可以用氩弧焊焊接，也可以用电子束进行熔焊。所得焊接接头在有余高时，试验温度为 -196 ~ 250℃范围内，强度与基体金属相同；无余高

时，焊接接头的强度由焊缝铸造金属的强度决定，约为基体金属强度的 85%，在不需热处理强化的铝合金中焊接系数是最高的。航天工业中已用这种合金作焊接承力件。表 2.11-29 列举了 01570 合金焊接接头的力学性能。

表 2.11-29 不同试验温度下 01570 合金焊接接头的力学性能

试验温度/℃	焊接接头的抗拉强度		焊接接头的强度系数		冷弯角 α / (°)	冲击韧度 a_K/J·cm^{-2}	
	σ_{b1}/MPa	σ_{b2}/MPa	σ_{b1}/σ_b	σ_{b2}/σ_b		焊缝	半熔合区
-253	458	458	0.72	0.72	—	17	96
-196	492	479	0.95	0.93	66	22	14
20	402	334	1.0	0.83	180	34	22
150	319	271	1.0	0.85	180	28	20
250	146	144	1.0	0.99	180	22	16

注：σ_{b1}—带余高，σ_{b2}—不带余高。

(2) 01571 合金

01571 合金的成分为 5.5% ~ 6.5% Mg、0.30% ~ 0.40% Sc、0.1% ~ 0.2%Zr、0.02% ~ 0.05%Ti 以及微量的稀土金属和硼。这种合金可以以板材、型材和锻件形式使用，强度比 01570 稍低，但塑性比 01570 合金要高。此外，01571 合金还可以焊丝形式供应用户，用于氩弧焊焊接 Al-Mg-Sc 和 Al-Zn-Mg-Sc 系合金。由于合金加入了 Sc、Zr、Ti 等微量元素，显著细化了焊缝的铸态组织，减弱了焊缝的热裂纹形成倾向。同时，由于焊缝结晶速度很快，微量 Sc、Zr 最大程度的溶入了 Al-Mg 合金固溶体中，在随后冷却过程中，Sc 和 Zr 以纳米级的 Al (Sc, Zr) 粒子析出，显著的提高了 Al-Mg-Sc 和 Al-Zn-Mg-Sc 合金焊接接头的强度。

(3) 01545 合金

该合金含 4.0% ~ 4.5% Mg 以及微量 Sc 和 Zr。由于 Mg 含量较 01570 合金为低，加工成形性能比 01570 合金好。在此基础上，俄罗斯又研制出了 01545K 合金，这种合金液氢温度下 (20 K) 有很高的强度和塑性，可用于液氢-液氧化燃料航天器贮箱和相应介质条件下的焊接构件。

(4) 01535 合金

该合金含 3.5% ~ 4.5% Mg 以及微量的 Sc、Zr。与 01570 和 01545 合金比，Mg 含量低，合金的强度也要低一些，但合金的塑性好，有利于半成品的后续加工，也减少了分层脱落腐蚀和应力腐蚀的倾向。拉伸性能为 $\sigma_b \geqslant 360$ MPa，$\sigma_{0.2} \geqslant 290$ MPa，$\delta \geqslant 16\%$。这种合金主要应用于低温条件下的焊接构件，如用于液化气罐等。

(5) 01523 合金

这种合金含 2% 左右的 Mg 和少量的 Sc 和 Zr。由于 Mg 含量低，合金有很好的抗蚀性、成形性和抗中子辐照性。但强度要比不含 Sc 的 AlMg2 合金高得多。这种合金可用于高腐蚀介质中工作的焊接构件，包括运送 H_2S 含量高的原油的容器管道以及有中子辐照场合的焊接构件。

(6) 01515 合金

这种合金含 1% 左右的 Mg 和少量 Sc 和 Zr。合金有较高的热导率和较高的屈服强度，可用于航天和航空工业的热交换器。表 2.11-30 列出了这种合金冷轧-退火态的力学性能。

表 2.11-30 01515 合金退火态力学性能

半成品材料	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%
板材 (2 mm 厚)	280	230	12
型材	260	230	15

2.2.2 Al-Zn-Mg-Sc 系合金

在俄罗斯，这个系的合金有 01970 和 01975 两个牌号。其中 Zn 含量为 4.5% ~ 5.5%，Mg 约为 2%，Zn/Mg 比为 2.6。此外，还有 0.3% ~ 1.0% 的 Cu，以及总量为 0.30% ~ 0.35% 的 Sc、Zr 等。

(1) 01970 合金

这种合金有很高的抵抗再结晶的能力。即使进行了很强的冷变形，合金的起始再结晶温度仍比淬火加热温度高。例如，冷变形量为 83% 的冷轧板，450℃ 固溶处理后水淬仍然保留了完整的非再结晶组织。01970 合金板材有很好的综合力学性能。表 2.11-31 列举了时效态 01970 合金板材的力学性能，作为对比，表中还录入了 1911 和 1903 高强可焊铝合金的一些数据。

表 2.11-31 01970，1911 和 1903 合金薄板淬火和人工时效态合金的拉伸力学性能

合金	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	K_{Ic}/MPa·m$^{1/2}$
01970	520	490	12	97
1911	416	356	11	77
1903	475	430	11	89

01970 合金冷轧板具有天然的超塑性，表 2.11-32 给出了这种合金的超塑性测试结果。

表 2.11-32 01970 合金在 475℃和应变速率为 6×10^{-3} s^{-1}条件下的超塑性

板厚/mm	样品取向	σ_b/MPa	δ/%
2	平行于轧向	13.9	635
2	垂直于轧向	14.7	576

01970 合金的过饱和固溶体稳定性高且存在于较宽的温度范围。超塑成形后的零件空冷后进行人工时效，合金的力学性能可达到 $\sigma_b = 530$ MPa，$\sigma_{0.2} = 470$ MPa，$\delta = 8\%$，这种独特的性能为气动成形生产高强度、形状复杂的精密零件提供了广阔的前景。

01970 合金还具有优异的可焊性，板材焊接前进行淬火和人工时效，然后用微量钪合金化的焊丝进行氩弧焊。表 2.11-33 给出了板厚为 2.5 mm 的 01970 合金焊接接头力学性能。

表 2.11-33 01970 合金板材焊接接头力学性能

合金	σ_b/MPa	冷弯角 α/ (°)	K_{CT}/MPa·m$^{1/2}$	σ_{cr}^{W}/MPa
01970	440	150	30	200
1911	360	143	28	175
1903	420	93	26	100

注：K_{CT}为断裂韧度；σ_{cr}^{W}为腐蚀应力。

表2.11-33中的数据为焊后100 d测试的结果，焊后继续延长停放时间，强度升高到500 MPa，此时焊接接头的塑性仍然很高并具有很高的抗应力腐蚀的能力。在应力腐蚀试验中拉伸应力为300 MPa的高应力条件连续作用1 000 h仍未发生应力腐蚀失效。

(2) 01975合金

这种合金与01970合金的化学组成很相近，区别在于合金中的含钪量较低。这种合金的可塑性好，挤压后空冷即可固溶处理。时效后的合金有高的强度、高的抗分层腐蚀能力、抗应力腐蚀的能力以及优异的可焊性。表2.11-34、表2.11-35和表2.11-36分别列举了这种合金人工时效状态的力学性能。

表2.11-34 01975合金薄板时效状态的力学性能

板厚/mm	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%
3	505	455	11.0
2	515	455	11.8
1	535	500	11.7

表2.11-35 01975合金中厚板时效状态的力学性能

样品取向	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	ψ/%	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$
纵向	440	395	17	52	67.5
横向	450	390	15	44	51.5
短横向	460	395	11	28	—

表2.11-36 01975合金挤压型材时效状态的力学性能

厚度/mm	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$
30	550	510	13	77
3	530	490	10	—

鉴于01975合金挤压制品有上述优异的综合性能，俄罗斯已建议将这种合金用于高速列车、地铁列车、桥梁等焊接载荷结构。

(3) 01981合金

俄罗斯研制了一种新的含铜的Al-Zn-Mg-Sc合金，将该合金命名为01981合金。该合金含少量Cu，据报道，这种合金有高的强度、高的弹性、低的各向异性和高的断裂抗力，具体数据还未公开。

2.2.3 Al-Mg-Li-Sc系合金

在商用01420铝锂合金（Al-5.5Mg-2Li-0.15Zr）基础上加入微量Sc形成了二种新的称之为01421、01423的合金。与所有铝锂合金一样，含钪铝锂合金均在惰性气体中保护下进行熔炼和铸造。铸锭均匀化后再进行热加工、冷加工和固溶-时效处理。这三种合金密度约为2.5 g·cm^{-3}，可焊性也很好，已成功地应用于航天和航空部门。表2.11-37列出了含钪（01421）和不含钪（01420）Al-Mg-Li-Zr合金的力学性能。

表2.11-37 01420和01421合金时效态的力学性能

合金牌号	半成品	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%
1420	棒材	500	380	8
1421	棒材	530	380	6

2.2.4 Al-Cu-Li-Sc系合金

(1) 01460合金

这种合金的成分为Al-3Cu-2Li-0.2～0.3（Sc，Zr）。时效状态合金的力学性能为σ_b = 550 MPa，$\sigma_{0.2}$ = 490 MPa，δ = 7%，可以用氩弧焊方法进行焊接，焊接性能和低温性能良好。测试温度从室温降到液氢温度，强度从550 MPa增加至680 MPa。伸长率则由7%增至10%，俄罗斯已将这种材料用于航天低温燃料储箱。在我国，航天用铝铜锂钪系合金已经列入“十五”863计划。

(2) 01464合金

近年来，俄罗斯在01460的基础上对Al-Cu-Li-Sc系合金的成分和工艺进行调整，在此基础上研制了称之为01464合金，合金的成分和制备工艺没有公开报道，但合金的性能已公开。合金的密度为2.65 g/cm^3，弹性模量为70～80 GPa。经机械热处理后，合金同时具有高的强度、高的塑性、耐蚀性、可焊性、抗冲击性和抗裂性。这种合金有高的热稳定性，可用于120℃下长期工作的航天航空飞行器构件。表2.11-38列出了这种合金的力学性能。

表2.11-38 01464合金时效态力学性能

半成品	取向	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$
厚板	纵向	560	520	9	18
	横向	540	480	10	20
薄板	纵向	530	470	10	—
	横向	520	470	13	—
异型材	纵向	580	540	6	20

3 Al-Fe-V系铝合金

3.1 概述

近些年来，为了简化工艺、降低成本、减少气体含量、提高材料韧度和塑性，开展了喷射沉积耐热铝合金，高强度铝合金等研究，取得很大成绩。Al-Fe-V系铝合金薄板拉伸性能见表2.11-39。Al-Fe-V-Si系铝合金管材力学性能见表2.11-40。

表2.11-39 Al-Fe-V系铝合金薄板拉伸性能

合金（长横向）	温度/℃	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%	K_{Ic}/MPa·m$^{1/2}$
Al-10.5Fe-2.5V	25	464.1	524.5	4.0	5.7
	316	206.3	200.0	6.9	8.1
Al-8Fe-1.4V-1.7Si	25	362.5	418.8	6.0	36.4
	316	184.4	193.8	8.0	14.9

表2.11-40 Al-Fe-V-Si系铝合金管材力学性能

材料	温度/℃	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%
挤压管	25	360	440	8.6
	350	155	185	9.2
旋压管	25	343	430	10.6
	350	176	193	8.2

3.2 合金各论

下面介绍8009合金。

(1) 成分和产品

8009合金是美国Allied Signals公司的金属及陶瓷材料研究所于1986年研制的一种性能优异的快速凝固耐热铝合金，1990年在美国铝业协会注册。类似合金我国有产品。化学成分见表2.11-41。

表 2.11-41 8009 合金化学成分 %

Fe	Si	V	Cr	Mn	O	Ti	Zn	其他		Al
								单个	合计	
8.4~8.9	1.7~1.9	1.1~1.5	≤0.1	≤0.1	≤0.3	≤0.1	≤0.25	≤0.05	≤0.15	余量

(2) 物理性能

1) 热性能

① 热导率为 95 W/(m·K)。

② 比热容 液态比热容 1 180 J/(kg·K); 固态比热容 903 J/(kg·K)。

③ 线胀系数见表 2.11-42。

表 2.11-42 快凝 AlFeVSi 合金在不同温度范围的线胀系数

合金	线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$			
	300~400 K	300~500 K	300~600 K	300~660 K
Al-8.9Fe-0.9V-1.5Si	18.9	21.2	22.3	23.0

2) 密度 (20℃) 为 2.92 g/cm^3。

(3) 力学性能

采用平流铸造法制造的 8009 合金挤压棒材不同温度下的力学性能见表 2.11-43。

表 2.11-43 不同温度下 8009 合金的力学性能

测试温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	弹性模量/GPa
24	462	413	12.9	88.4
149	379	345	7.2	82.2
232	338	310	8.2	73.1
316	276	255	11.9	65.5
427	155	138	15.1	61.4

(4) 耐腐蚀性能

由于具有细晶均质的特点，且不含 Cu、Zn 等降低耐蚀性元素，快速凝固耐热铝合金通常表现良好的抗腐蚀性能，其抗蚀能力与 6061-T6 相当，而明显优于 2×××系和 7×××系铝合金。它们的应力腐蚀扩展门槛值均高于其屈服强度的 75%。而且高温热曝露几乎对耐蚀性无明显影响。

(5) 熔铸工艺与热处理制度

美国 Allied Signals 公司的 8009 合金采用其专利技术——平流铸造法 (PFC) 制粉，粉末冶金工艺成形来生产。工艺流程是：熔融的合金在气体的压力下喷到高速旋转的辊轮表面，而后在离心力的作用下用薄带的形式抛射出来，再将收集到的薄带磨成细粉，经真空固结成形后，热加工成各种形状的材料。目前，人们也采用各种雾化技术和喷射沉积工艺制备 AlFeVSi 合金，该合金已成了目前最为成熟的高性能耐热铝合金。

(6) 选用实例

目前，快速凝固耐热铝合金的产品主要有挤压管、棒、型材、轧制薄板与厚板、大型锻件、轧环、线材以及旋压封头等产品，用来制造如飞机机翼、机身等结构件、大型轮毂、导弹壳体与尾翼、航空发动机气缸、轻质铆钉与紧固件以及汽车的活塞、连杆等耐热零部件等。

编写：郑子樵（中南大学）
尹志民（中南大学）
审稿：唐仁政（中南大学）

第12章　铸造铝合金

1　概述

铸造铝合金是为生产铸件，不需压力加工，有的经过机械加工，表面处理，有的仅经清理就可装机使用。因此，对铸造铝合金要求，要有好的流动性能、铸造性能、充型性能和力学性能。为达到此目的，铸造铝合金中所含合金元素一般种类多而含量高。合金组织中有较多的共晶体，能获得好的铸造性能，适用于铸造零件。概括来讲，铸造铝合金塑性较低，力学性能中等，亦可通过热处理强化或调整力学性能。

应该指出，铸造铝合金和变形铝合金的界限并非截然分开的，有的铝合金既可用于铸造，又可用于压力加工。如铝硅合金，一般作铸造合金用，但也可加工成薄板、带和线；变形铝合金中也有用来浇注成铸件用的。

全世界每年消费的铝中，有15%～20%用于铸造铝合金。我国2001年生产铸造铝合金110万吨，2002年150万吨，2003年达180万吨，可见铸造铝合金在国民经济中的重要性。

1.1　标示

我国铸造铝合金的标示系统见图2.12-1。

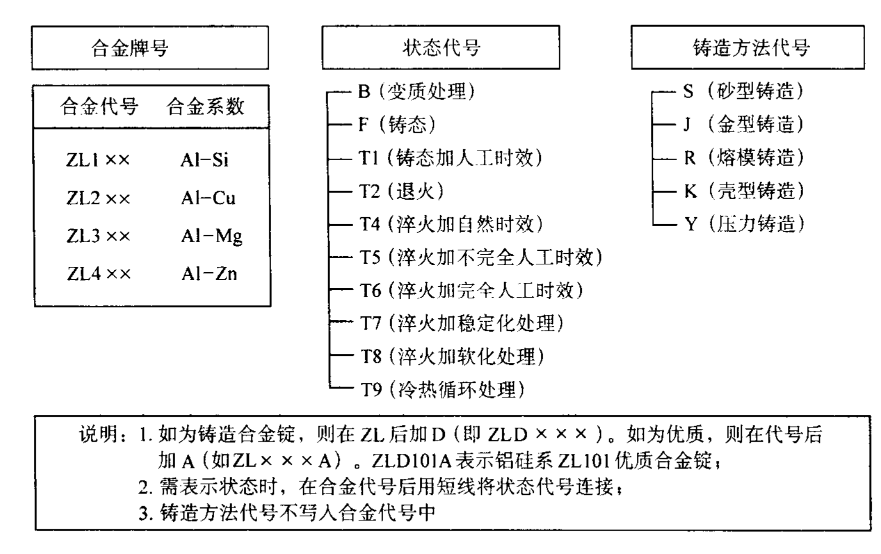


图2.12-1　铸造铝合金牌号、状态和铸造方法标示系统

1.2　铸造铝合金的分类和化学成分

1.2.1　铸造铝合金的分类

铸造铝合金共分成四个系列（类）。

1）Al-Si合金系　该系合金又称为“硅铝明”，一般Si含量为4%～22%。Al-Si合金具有优良的铸造性能，经过变质处理和热处理之后，具有良好的力学性能、物理性能、耐腐蚀性能和中等的切削加工性能，是铸造铝合金中品种最多，用途最广的合金系。

2）Al-Cu合金系　该系合金中Cu含量为3%～11%，加入其他元素使室温和高温力学性能大幅度提高，如ZL205A-T6合金的标准性能抗拉强度（σ_b）为490 MPa，是目前世界上强度最大的铸造铝合金之一，ZL206、ZL207和ZL208合金具有很高的耐热性能。ZL207合金中添加了混合稀土，提高了合金的高温强度和热稳定性，可用于350～400℃下工作的零件，缺点是室温力学性能较差，特别是伸长率很低。Al-Cu系合金具有良好的切削加工和焊接性能，但铸造性能和耐腐蚀性能较差。这类合金在航空产品上应用较广，主要用作承受大载荷的结构件和耐热零件。

3）Al-Mg合金系　该系合金中Mg的含量为4%～11%，密度小，具有较高的力学性能，优异的耐腐蚀性能，良好的可切削加工性能，加工表面光亮美观。该类合金熔炼和铸造工艺较复杂，除用作耐蚀合金外，也用作装饰用合金。

4）Al-Zn合金系　Zn在Al中的溶解度大，当Al中加入Zn大于10%时，能显著提高合金的强度，该类合金自然时效倾向大，不需要热处理就能得到较高的强度。这类合金的缺点是耐腐蚀性能差，密度大，铸造时容易产生热裂，主要用做压铸仪表壳体类零件。

1.2.2　铸造铝合金的牌号、代号及化学成分

1）铝硅系铸造铝合金的牌号、代号及化学成分见表2.12-1和表2.12-2。

2）铝铜系铸造铝合金的牌号、代号和化学成分见表2.12-3和表2.12-4。

3）铝镁系铸造铝合金的牌号、代号和化学成分见表2.12-5和表2.12-6。

4）铝锌系铸造铝合金的牌号、代号和化学成分见表2.12-7和表2.12-8。

1.3　铸造铝合金各国牌号对照

1）铝硅系铸造铝合金的牌号及代号对照见表2.12-9。

2）铝铜系铸造铝合金的牌号和代号的对照见表2.12-10。

3）铝镁系铸造铝合金的牌号及代号对照见表2.12-11。

4）铝锌系铸造铝合金的牌号及代号对照见表2.12-12。

1.4　铸造铝合金的性能

1.4.1　铸造铝合金的力学性能

1）铝硅系铸造铝合金力学性能见表2.12-13和表2.12-14。

表 2.12-1　Al-Si 合金的化学成分（摘自 GB/T 1173—1995、GB/T 15115—1994）

合金牌号	合金代号	主要元素 /%						
		Si	Cu	Mg	Mn	Ti	其他	Al
ZAlSi7Mg	ZL101	6.5~7.5	—	0.25~0.45	—	—	—	余量
ZAlSi7MgA	ZL101A	6.5~7.5	—	0.25~0.45	—	0.08~0.20	—	余量
ZAlSi12	ZL102	10.0~13.0	—	—	—	—	—	余量
—	ZL103①	4.5~6.0	1.5~3.0	0.3~0.7	0.3~0.7	—	—	余量
ZAlSi9Mg	ZL104	8.0~10.5	—	0.17~0.35	0.2~0.5	—	—	余量
ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	4.5~5.5	1.0~1.5	0.4~0.6	—	—	—	余量
ZAlSi5Cu1MgA	ZL105A	4.5~5.5	1.0~1.5	0.4~0.55	—	—	—	余量
ZAlSi8Cu1Mg	ZL106	7.5~8.5	1.0~1.5	0.3~0.5	0.3~0.5	0.10~0.25	—	余量
ZAlSi7Cu4	ZL107	6.5~7.5	3.5~4.5	—	—	—	—	余量
ZAlSi12Cu1Mg1	ZL108	11.0~13.0	1.0~2.0	0.4~1.0	0.3~0.9	—	—	余量
ZAlSi12Cu1Mg1Ni1	ZL109	11.0~13.0	0.5~1.5	0.8~1.3	—	—	Ni0.8~1.5	余量
ZAlSi5Cu6Mg	ZL110	4.0~6.0	5.0~8.0	0.2~0.5	—	—	—	余量
ZAlSi9Cu2Mg	ZL111	8.0~10.0	1.3~1.8	0.4~0.6	0.10~0.35	0.10~0.35	—	余量
ZAlSi7Mg1A	ZL114A	6.5~7.5	—	0.45~0.60	—	0.10~0.20	Be0.05~0.07②	余量
ZAlSi5Zn1Mg	ZL115	4.8~6.2	—	0.4~0.65	—	Zn1.2~1.8	Sb0.1~0.25	余量
ZAlSi8MgBe	ZL116	6.5~8.5	—	0.35~0.55	—	0.10~0.30	Be0.15~0.40	余量
ZAlSi20Cu2RE1	ZL107	19~22	1.0~2.0	0.4~0.8	0.3~0.5	—	RE0.5~1.5	余量
YZAlSi12	YL102	10.0~13.0	—	—	—	—	—	余量
YZAlSi10Mg	YL104	8.0~10.5	—	0.17~0.30	0.2~0.5	—	—	余量
YZAlSi12Cu2	YL108	11.0~13.0	1.0~2.0	0.4~1.0	0.3~0.9	—	—	余量
YZAlSi9Cu4	YL112	7.5~9.5	3.0~4.0	—	—	—	—	余量
YZAlSi11Cu3	YL113	9.6~12.0	1.5~3.5	—	—	—	—	余量
YZAlSi17Cu5Mg	YL117	16.0~18.0	4.0~5.0	0.45~0.65	—	—	—	余量

① 该合金为 GB/T 1173—1974 标准代号，部分企业还在使用。
② 在保证合金力学性能的前提下，可以不加 Be。

表 2.12-2　Al-Si 合金的杂质限量（摘自 GB/T 1173—1995、GB/T 15115—1994）

合金牌号	合金代号	杂质限量 /% ≤														
		Fe		Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	Zr	Ti+Zr	Be	Ni	Sn	Pb	杂质总和	
		S	J												S	J
ZAlSi7Mg	ZL101	0.5	0.9	0.2	—	0.3	0.35	—	—	0.25	0.1	—	0.01	0.05	1.1	1.5
ZAlSi7MgA	ZL101A	0.2	0.2	0.1	—	0.1	0.10	—	0.20	—	—	—	0.01	0.03	0.7	0.7
ZAlSi12	ZL102	0.7	1.0	0.30	0.10	0.1	0.5	0.20	—	—	—	—	—	—	2.0	2.2
—	ZL103	0.6	1.2	—	—	0.3	—	—	—	—	—	—	0.01	0.05	1.2	1.8
ZAlSi9Mg	ZL104	0.6	0.9	0.1	—	0.25	—	—	—	0.15	—	—	0.01	0.05	1.1	1.4
ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	0.6	1.0	—	—	0.3	0.5	—	—	0.15	0.1	—	0.01	0.05	1.1	1.4
ZAlSi5Cu1MgA	ZL105A	0.2	0.2	—	—	0.1	0.1	—	—	—	—	—	0.01	0.05	0.5	0.5
ZAlSi8Cu1Mg	ZL106	0.6	0.8	—	—	0.2	—	—	—	—	—	—	0.01	0.05	0.9	1.0
ZAlSi7Cu4	ZL107	0.5	0.6	—	0.1	0.3	0.5	—	—	—	—	—	0.01	0.05	1.0	1.2
ZAlSi12Cu2Mg1	ZL108	—	0.7	—	—	0.2	—	0.20	—	—	—	0.3	0.01	0.05	—	1.2
ZAlSi12Cu1Mg1Ni1	ZL109	—	0.7	—	—	0.2	0.2	0.20	—	—	—	—	0.01	0.05	—	1.2
ZAlSi5Cu6Mg	ZL110	—	0.8	—	—	0.6	0.5	—	—	—	—	—	0.01	0.05	—	2.7
ZAlSi9Cu2Mg	ZL111	0.4	0.4	—	—	0.1	—	—	—	—	—	—	0.01	0.05	1.0	1.0
ZAlSi7Mg1A	ZL114A	0.2	0.2	—	—	0.1	0.1	0.1	—	0.20	—	—	0.01	0.03	0.75	0.75
ZAlSi5Zn1Mg	ZL115	0.3	0.3	0.1	—	—	0.1	—	—	—	—	—	0.01	0.05	0.8	1.0
ZAlSi8MgBe	ZL116	0.60	0.60	0.3	—	0.3	0.1	—	0.20	B0.10	—	—	0.01	0.05	1.0	1.0
ZAlSi20Cu2RE1	ZL107	—	1.0	—	—	0.1	—	0.2	0.1	—	—	—	0.01	0.05	—	—

续表 2.12-2

合金牌号	合金代号	杂质限量 /% ≤														
		Fe		Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	Zr	Ti+Zr	Be	Ni	Sn	Pb	杂质总和	
		S	J												S	J
YZAlSi12	YL102	1.2		0.6	0.05	0.3	0.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
YZAlSi10Mg	YL104	1.0		0.3	—	0.3	—	—	—	—	—	—	0.01	0.05	—	—
YZAlSi12Cu2	YL108	1.0		—	—	1.0	—	—	—	—	—	0.05	0.01	0.05	—	—
YZAlSi9Cu4	YL112	1.2		—	0.3	1.2	0.5	—	—	—	—	0.5	0.1	0.1	—	—
YZAlSi11Cu3	YL113	1.2		—	0.3	1.0	0.5	—	—	—	—	0.5	0.1	0.1	—	—
YZAlSi17Cu5Mg	YL117	1.2		—	—	1.2	0.5	0.1	—	—	—	0.1	—	—	—	—

表 2.12-3 Al-Cu 合金的化学成分（摘自 GB/T 1173—1995）

合金牌号	合金代号	主要元素 /%					
		Cu	Mg	Mn	Ti	其他元素	Al
ZAlCu5Mn	ZL201	4.5~5.3	—	0.6~1.0	0.15~0.35	—	余量
ZAlCu5MnA	ZL201A	4.8~5.3	—	0.6~1.0	0.15~0.35	—	余量
ZAlCu10	ZL202[①]	9.0~11.0	—	—	—	—	余量
ZAlCu4	ZL203	4.0~5.0	—	—	—	—	余量
ZAlCu5MnCdA	ZL204A	4.6~5.3	—	0.6~0.9	0.15~0.35	Cd0.15~0.25	余量
ZAlCu5MnCdVA	ZL205A	4.6~5.3	—	0.3~0.5	0.15~0.35	Cd0.15~0.25 V0.0.5~0.3 Zr0.05~0.2 B0.005~0.06	余量
ZAlRE5Cu3Si2	ZL207	3.0~3.4	0.15~0.25	0.9~1.2	—	Ni0.2~0.3 Zr0.15~0.25 Si1.6~2.0 RE4.4~5.0[②]	余量

① GB/T 1173—1986 合金成分。
② 混合稀土含各种稀土总量不少于 98%，其中含铈约 45%。

表 2.12-4 Al-Cu 合金杂质限量（摘自 GB/T 1173—1995）

合金牌号	合金代号	杂质限量 /% ≤											
		Fe		Si	Mg	Zn	Mn	Zr	Ni	Sn	Pb	杂质总和	
		S	J									S	J
ZAlCu5Mn	ZL201	0.25	0.3	0.3	0.05	0.2	—	0.2	0.1	—	—	1.0	1.0
ZAlCu5MnA	ZL201A	0.15	—	0.1	0.05	0.1	—	0.15	0.05	—	—	0.4	
ZAlCu10	ZL202	1.0	1.2	1.2	0.3	0.8	—	—	0.5	—	—	2.8	3.0
ZAlCu4	ZL203	0.8	0.8	1.2	0.05	0.25	0.1	0.1	Ti0.20	0.01	0.05	2.1	2.1
ZAlCu5MnCdA	ZL204A	0.15	0.15	0.06	0.05	0.1	—	0.15	0.05	—	—	0.4	—
ZAlCu5MnCdVA	ZL205A	0.15	0.15	0.06	0.05	—	—	—	—	0.01	—	0.3	0.3
ZAlRE5Cu3Si2	ZL207	0.6	0.6	—	—	0.2	—	—	—	—	—	0.8	0.8

表 2.12-5 Al-Mg 合金的化学成分（摘自 GB/T 1173—1995）

合金牌号	合金代号	主要元素 /%						
		Si	Mg	Zn	Mn	Ti	其他	Al
ZAlMg10	ZL301	—	9.5~11.0	—	—	—	—	余量
ZAlMg5Si	ZL303	0.8~1.3	4.5~5.5	—	0.1~0.4	—	—	余量
ZAlMg8Zn1	ZL305	—	7.5~9.0	1.0~1.5	—	0.1~0.2	Be0.03~0.1	余量

表 2.12-6 Al-Mg 合金杂质限量（摘自 GB/T 1173—1995）

合金牌号	合金代号	杂质限量 /% ≤														
		Fe			Si	Cu	Zn	Mn	Ti	Zr	Be	Ni	Sn	Pb	杂质总和	
		S	J	Y											S	J
ZAlMg10	ZL301	0.3	0.3	—	0.30	0.10	0.15	0.15	0.15	0.20	0.07	0.05	0.01	0.05	1.0	1.0
ZAlMg5Si	ZL303	0.5	0.5	1.3	—	0.10	0.2	—	0.2	—	—	—	—	—	0.7	0.7
ZAlMg8Zn1	ZL305	0.3	—	—	0.2	0.10	—	0.1	—	—	—	—	—	—	0.9	—

10

表 2.12-7　Al-Zn 合金的化学成分（摘自 GB/T 1173—1995）

合金牌号	合金代号	主要元素 /%					
		Si	Mg	Zn	Ti	其他	Al
ZAlZn11Si7	ZL401	6.0～8.0	0.1～0.3	9.0～13.0	—	—	余量
ZAlZn6Mg	ZL402	—	0.5～0.65	5.0～0.65	0.15～0.25	Cr0.4～0.6	余量

表 2.12-8　Al-Zn 合金杂质限量（摘自 GB/T 1173—1995）

合金牌号	合金代号	杂质限量 /% ≤								
		Fe			Si	Cu	Mn	Sn	杂质总和	
		S	J	Y					S	J
ZAlZn11Si7	ZL401	0.7	1.2	1.3	—	0.6	0.5	—	1.8	2.0
ZAlZn6Mg	ZL402	0.5	0.8	—	0.3	0.25	0.1	0.01	1.35	1.65

表 2.12-9　各国 Al-Si 合金牌号及代号的对照

中国(GB/T 1173—1995)		相近国际牌号	美国				日本	俄罗斯	英国	法国	德国	欧洲标准
合金牌号	合金代号	ISO 3522—1984	UNS ASTM E527—1983 (1997)	ANSI H35.1(M)—1997	SAE J452—1989	ASTM B275—1996	JIS H5202—1999 JIS H5302 2000	ГОСТ 1583—1993	BS 1490—1988	NF A57-702—1981 NF A57-703—1984	DIN 1725-2—1986 DIN 1725-2 Bb.1—1986	EN 1706—1998
ZAlSi7Mg	ZL101	Al-Si7Mg (Fe)	A03560	356.0	323	SC70A	AC4C	AЛ19	LM25	A-S7G	G-AlSi7Mg	AC-42100
ZAlSi7MgA	ZL101A	Al-Si7Mg	A13560	A356.0	336	SC70B	AC4CH	AЛ19-1	—	A-S7G03		
ZAlSi12	ZL102	Al-Si12	—	—	—	—	AC3A	AЛ2	LM6	A-S13	G-AlSi12	AC-44200
YZAlSi12	YL102	Al-Si12Fe	A14130	A413.0	305	S12A	ADC2	—	LM20	—	—	AC-44300
ZAlSi9Mg	ZL104	Al-Si10Mg	A03590	—	—	—	AC4A	AЛ4	LM9	A-S9G	G-AlSi10Mg	AC-43400
YZAlSi10Mg	YL104	—	A13600	A360.0	309	SG100A	—	—	—	—	—	AC-43000
ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	Al-Si5Cu1Mg	A03550	355.0	322	SC51A	AC4D	AЛ5	LM16	—	G-AlSi5(Cu)	AC-45300
ZAlSi5Cu1MgA	ZL105A	—	A33550	C355.0	335	SC51B	—	AЛ5-1	—	—	—	AC-45300
ZAlSi8Cu1Mg	ZL106	Al-Si5Cu3	A03280	328.0	327	SC82A	—	AЛ32	LM27	—	—	AC-46400
ZAlSi7Cu4	ZL107	Al-Si6Cu4	A03190	319.0	326	SC64D	AC2B	—	LM21	A-S5UZ	G-AlSi6Ci4	AC-45000
ZAlSi12Cu2Mg1	ZL108	Al-Si12Cu	—	—	—	SC122A	AD12	AЛ25	LM2 LM13	—	—	—
YZAlSi12Cu2	YL108	Al-Si12CuFe	—	—	—	—	—	—		—	—	—
ZAlSi12Cu1Mg1Ni1	ZL109	—	A03360	336.0 339.0	321 334	SN122A	AC8A	AЛ30		A-S12UNG	—	AC-48000
ZAlSi5Cu6Mg	ZL110	—		—		CS74A	—	AЛ10B	LM12	—	G-AlSi(Cu)	—
ZAlSi9Cu2Mg	ZL111	—	A03280 A03540	328.0 354.0	327 —	SC82A SC92A	—	AK9M2 AЛ4M	—	—	G-AlSi8Cu3	AC-46400
YZAlSi9Cu4	YL112	Al-Si8Cu3Fe	A03800	380.0	308	SG84B	ADC11	—	—	—	—	AC-46200
YZAlSi11Cu3	YL113	—	—	—	—	—	ADC12	—	—	—	—	AC-46100
ZAlSi7Mg1A	ZL114A	—	A13570	A357.0	—	—	—	—	—	A-S7G06	—	—
ZAlSi8MgBe	ZL116	—	—	B358.0	—	—	—	AЛ34	—	—	—	—
YZAlSi17Cu5Mg	YL117	—	A23900	B390.0	—	SC174B	AC9B	—	LM30	—	—	—

表 2.12-10　各国 Al-Cu 合金牌号及代号对照

中国（GB/T 1173—1995）		相近国际牌号（ISO）	美国				日本	俄罗斯	英国	法国	德国	欧洲标准
合金牌号	合金代号		UNS	ANSI	SAE	ASTM	JIS	ΓOCT	BS	NF	DIN	EN
ZAlCu5Mn	ZL201	Al-Cu4Ti	—	—	—	—	—	AЛ19	—	A-U5GT	G-AlCuTi	—
ZAlCu10	ZL202①	—	—	122	—	—	—	—	LM12	—	—	—
ZAlCu4	ZL203	Al-Cu4Ti	A02950	295.0	38	C4A	AC1A	AЛ7		—	G-AlCu4Ti	AC-21100
ZAlRE5Cu3Si2	ZL207	—	—	—	—	—	—	AЛ[illegible]Y	—	—	—	—

① GB/T 1173—1986 标准的合金。

表 2.12-11　各国 Al-Mg 合金牌号及代号对照

中国(GB/T 1173—1995)		相近国际牌号(ISO)	美国				日本	俄罗斯	英国	法国	德国	欧洲标准
合金牌号	合金代号		UNS	ANSI	SAE	ASTM	JIS	ГОСТ	BS	NF	DIN	EN
ZAlMg10	ZL301	AlMg10	A05200	520.0	324	G10A	AC7B	АЛ8 АЛ27	LM10	A-G10Y4	G-AlMg10	—
ZAlMg5Si1	ZL303	AlMg5Si1	—	—	—	GS42A	AC4CH	АЛ13	LM5	—	G-AlMg5Si	AC-51400

表 2.12-12　各国 Al-Zn 合金牌号及代号对照

中国（GB/T 1173—1995）		相近国际牌号（ISO）	美国				俄罗斯	法国	欧洲标准
合金牌号	合金代号		UNS	ANSI	SAE	ASTM	ГОСТ	NF	EN
ZAlZn11Si7	ZL401	—	—	—	—	—	АЛ11	—	—
ZAlZn6Mg	ZL402	AlZn5Mg	A07120	712.0	310	D612	—	A-Z5G	AC-71000

表 2.12-13　Al-Si 合金标准性能（摘自 GB/T 1173—1995）

合金牌号	合金代号	铸造方法	热处理状态	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ_5/%	硬度 HB
				≥		
ZAlSi7Mg	ZL101	S、R、J、K	F	155	2	50
		S、R、J、K	T2	135	2	45
		JB	T4	185	4	50
		S、R、K	T4	175	4	50
		J、JB	T5	205	2	60
		S、R、K	T5	195	2	60
		SB、RB、KB	T5	195	2	60
		SB、RB、KB	T6	225	1	70
		SB、RB、KB	T7	195	2	60
		SB、RB、KB	T8	155	3	55
ZAlSi7MgA	ZL101A	S、R、K	T4	195	5	60
		J、JB	T4	225	5	60
		S、R、K	T5	235	4	70
		SB、RB、KB	T5	235	4	70
		JB、J	T5	265	4	70
		SB、RB、KB	T6	275	2	80
		JB、J	T6	295	3	80
ZAlSi12	ZL102	SB、JB、RB、KB	F	145	4	50
		J	F	155	2	50
		SB、JB、RB、KB	T2	135	4	50
		J	T2	145	3	50
—	ZL103①	S	F	140	0.5	65
		J	F	170	0.5	65
		S、J	T1	170	—	70
		S、J	T2	150	1	65
		S	T5	220	0.5	75
		J	T5	250	0.5	75
		S、J	T7	210	1	70
		S、J	T8	180	2	65
ZAlSi9Mg	ZL104	S、J、R、K	F	145	2	50
		J	T1	195	1.5	65
		SB、RB、KB	T6	225	2	70
		J、JB	T6	235	2	70
ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	S、J、R、K	T1	155	0.5	65
		S、R、K	T5	195	1	70
		J	T5	235	0.5	70
		S、R、K	T6	225	0.5	70
ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	S、J、R、K	T7	175	1	65
ZAlSi5Cu1MgA	ZL105A	SB、R、K	T5	275	1	80
		J、JB	T5	295	2	80
ZAlSi8Cu1Mg	ZL106	SB	F	175	1	70
		JB	T1	195	1.5	70
		SB	T5	235	2	60
		JB	T5	255	2	70
		SB	T6	245	1	80
		JB	T6	265	2	70
		SB	T7	225	2	60
		J	T7	245	2	60
ZAlSi7Cu4	ZL107	SB	F	165	2	65
		SB	T6	245	2	90
		J	F	195	2	70
		J	T6	275	2.5	100
ZAlSi12Cu1Mg1	ZL108	J	T1	195	—	85
		J	T6	255	—	90
ZAlSi12Cu1Mg1Ni1	ZL109	J	T1	195	0.5	90
		J	T6	245	—	100
ZAlSi5Cu6Mg	ZL110	S	F	125	—	80
		J	F	155	—	80
		S	T1	145	—	80
		J	T1	165	—	90
ZAlSi9Cu2Mg	ZL111	J	F	205	1.5	80
		SB	T6	255	1.5	90
		J、JB	T6	315	2	100
ZAlSi7Mg1A	ZL114A	SB	T5	290	2	85
		J、JB	T5	310	3	90
ZAlSi5Zn1Mg	ZL115	S	T4	225	4	70
		J	T4	275	6	80
		S	T5	275	3.5	90
		J	T5	315	5	100
ZAlSi8MgBe	ZL116	S	T4	255	4	70
		J	T4	275	6	80
		S	T5	295	2	85
		J	T5	335	4	90

① 该合金为 GB/T 1173—1974 标准代号，由于现在还有企业在使用，列出供参考。

表 2.12-14　Al-Si 压铸合金标准性能（摘自 GB/T 15115—1994）

合金牌号	合金代号	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ_5 /%	硬度 HB	合金牌号	合金代号	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ_5 /%	硬度 HB
		≥					≥		
YZAlSi12	YL102	220	2	60	YZAlSi9Cu4	YL112	240	1	85
YZAlSi10Mg	YL104	220	2	70	YZAlSi11Cu3	YL113	230	1	80
YZAlSi12Cu2	YL108	240	1	90	YZAlSi17Cu5Mg	YL117	220	<1	—

2）铝铜系铸造铝合金的力学性能见表 2.12-15。

目前，国内常选用美国的 201.0、A201.0、206.0 及俄罗斯的 BAJI10 合金。它们的共同特点是含 4.0% ~ 5.2% Cu、0.15% ~ 0.35% Ti。201.0 和 206.0 合金还含有 0.15% ~ 0.35%Mg、0.35% ~ 0.8%Mn 和 0.40% ~ 1.0%Ag。而 BAJI10 合金不含 Mg，含 0.35% ~ 0.8%Mn 和 0.07% ~ 0.25%Cd。这些合金在热处理状态下抗拉强度和伸长率高，参见表 2.12-16。

表 2.12-15　Al-Cu 合金标准力学性能
（摘自 GB/T 1173—1995）

合金牌号	合金代号	铸造方法	热处理状态	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_5 /%	硬度 HB
				≥		
ZAlCu5Mn	ZL201	S、J、R、K	T4	295	8	70
		S、J、R、K	T5	335	4	90
		S	T7	315	2	80
ZAlCu5MnA	ZL201A	S、J、R、K	T5	390	8	100
ZAlCu10	ZL202①	S、J	F	104	—	50
		S、J	T6	163	—	100
ZAlCu4	ZL203	S、R、K	T4	195	6	60
		J	T4	205	6	60
		S、R、K	T5	215	3	70
		J	T5	225	3	70
ZAlCu5MnCdA	ZL204A	S	T5	440	4	100
ZAlCu5MnCdVA	ZL205A	S	T5	440	7	100
		S	T6	470	3	120
		S	T7	460	2	110
ZAlRE5Cu3Si2	ZL207	S	T1	165	—	75
		J	T1	175	—	75

① 为 GB/T 1173—1986 标准的合金性能。

表 2.12-16　美国 201.0、206.0 和俄罗斯 BAJI10 合金力学性能

合金	铸造方法	热处理状态	力学性能≥		
			σ_b/MPa	σ_5/%	HB
201.0	S	T7	415	3	—
206.0	S、J	T4	275	8	—
BAJI10	S、R	T4	330	10	70
	J	T4	320	12	80
	S、R	T5	400	7	90
	J	T5	440	8	100
	S、R	T6	430	4	110
	J	T6	500	4	120
	S	T7	330	5	90

3）铝镁系铸造铝合金的力学性能见表 2.12-17。

表 2.12-17　Al-Mg 合金标准性能
（摘自 GB/T 1173—1995）

合金牌号	合金代号	铸造方法	热处理状态	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ_5/%	硬度 HB
				≥		
ZAlMg10	ZL301	S、J、R	T4	280	10	60
YZAlMg5Si1	YL302①	Y	F	220	2	70
ZAlMg5Si	ZL303	S、J、R、K	F	145	1	55
ZAlMg8Zn1	ZL305	S	T4	290	8	90

① 为 GB/T 15115—1994 标准的合金性能。

4）铝锌系铸造铝合金的力学性能见表 2.12-18。

表 2.12-18　Al-Zn 合金标准性能
（摘自 GB/T 1173—1995）

合金牌号	合金代号	铸造方法	热处理状态	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ_5/%	硬度 HB
				≥		
ZAlZn11Si7	ZL401	S、R、K	T1	195	2	80
		J	T1	245	1.5	90
		S	F	200	2	80
		J	F	230	1	90
		Y①	F	220	2	75
ZAlZn6Mg	ZL402	J	T1	235	4	70
		S	T1	215	4	65

① 为 GB/T 15115—1994 的合金性能。

1.4.2　铸造铝合金的物理性能

1）铝硅系铸造铝合金的物理性能见表 2.12-19。
2）铝铜系铸造铝合金的物理性能见表 2.12-20。
3）铝镁系铸造铝合金的物理性能见表 2.12-21。
4）铝锌系铸造铝合金的物理性能见表 2.12-22。

1.4.3　铸造铝合金的铸造性能和可切削性能

铸造铝合金的铸造性能和可切削性能见表 2.12-23。

1.5　铸造铝合金的重要特点及用途

铸造铝合金的选用，应该考虑铸造方法、铸件设计、要求性能和经济（或实用性）等方面。每种铸造方法要求相适应的金属特性。如压力铸造和金属型铸造要求合金具有良好的流动性和抗热裂性；而砂型、石膏型和熔模铸造对上述性能要求并不高，因为这些铸造的铸型和型芯具有较小的收缩阻力。

铸件设计对强度和塑性以及特殊使用要求，如压力特性、抗腐蚀性和表面处理等，因此对合金有一定的选择。在选择合金时经济也是重要因素，如热处理、可焊性和可切削性能以及熔化费用等都影响铸件的总成本。

表 2.12-19 Al-Si 合金的物理性能

合金代号	密度 ρ /g·cm^{-3}	熔化温度范围/℃	电阻率 ρ /μΩ·m	电导率 γ /%IACS[①]	热导率 λ/W·(m·K)$^{-1}$					线胀系数 α /10^{-6}K^{-1}			比热容 c/J·(kg·K)$^{-1}$			
					25℃	100℃	200℃	300℃	400℃	20~100℃	20~200℃	20~300℃	100℃	200℃	300℃	400℃
ZL101	2.68	557~613	0.045 7	39	150.7	154.9	163.3	167.47	167.5	21.5	22.5	23.5	879	921	1 005	—
ZL101A	2.68	557~613	—	40	150.7	154.9	163.3	167.5	167.5	21.5	22.5	23.5	879	921	1 005	—
ZL102	2.65	577~600	0.054 8	39	154.91	167.47	167.47	167.47	167.47	21.1	22.1	23.3	837	879	921	1 005
ZL104	2.63	555~595	0.046 8	37	113	154.9	159.1	159.1	154.9	21	22	23	754	796	837	921
ZL105	2.71	546~621	0.046 2	36	159.1	163.3	167.5	175.9	—	22.4	23	24	837	963	1 047	1 130
ZL105A	2.71	546~621	—	39	159.1	163.3	167.5	175.9	—	22.4	23	24	837	963	1 047	1 130
ZL106	2.73	552~596	—	30	121	—	—	—	—	21.4	—	23.2	—	—	—	—
ZL107	2.80	516~604	—	27	109	—	—	—	—	21.5	23	23.5	963	—	—	—
ZL108	2.68	—	—	—	159.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ZL109	2.71	538~566	0.059 5	29	117	—	—	—	—	18.9	20	20.9	—	—	—	—
ZL110	2.89	—	—	—	—	—	—	—	—	22.3	23.3	25.4	—	—	—	—
ZL111	2.71	552~596	0.059 5	32	128	—	—	—	—	20.9	21.5	22.9	963	—	—	—
ZL114A	2.68	557~613	—	40	152	—	—	—	—	21.6	22.6	23.6	963	—	—	—
ZL116	2.66	557~596	—	39	150.7	—	—	—	—	21.4	—	23.4	—	—	—	—
ZL117	2.65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	17.7	—	—	—	—	—
YL102	2.66	574~582	—	31	121	—	—	—	—	—	21.4	—	—	—	—	—
YL104	2.63	557~596	—	29	113	—	—	—	—	—	22	—	—	—	—	—
YL112	2.72	538~593	0.075	27	108.8	—	—	—	—	21.2	22.0	22.5	963	—	—	—
YL113	2.73	558~571	—	23	92	—	—	—	—	20.8	—	22.1	—	—	—	—
YL117	2.73	505~650	—	27	134	—	—	—	—	18	—	—	—	—	—	—

① %IACS 为国际标准退火铜标准的百分数，为英制单位。国际法定单位为"MS/m"。1%IACS = 0.580 046 MS/m，其中 1 S = 1 Ω^{-1}。

表 2.12-20a Al-Cu 合金的物理性能（1）

合金代号	热处理状态	密度 ρ /g·cm^{-3}	熔化温度范围/℃	电阻率 ρ /μΩ·m	电导率 γ /%IACS	热导率 λ/W·(m·K)$^{-1}$			
						25℃	100℃	200℃	300℃
ZL201	T4	2.78	548~650	0.059 5	—	113.0	121.4	134.0	146.5
ZL201A	T5	2.83	548~650	—	—	—	127.7	148.6	171.7
ZL202	T6	2.80	—	—	—	—	—	—	—
ZL203	T5	2.80	548~650	0.043 3	35	154.9	163.3	171.7	175.9
ZL204A	T6	2.81	544~633	—	—	—	—	—	—
ZL205A	T5					105	117	130	142
	T6	2.82	544~633	—	25	113	121	138	155
	T7					117	130	151	168
ZL206	T7	2.90	542~631	0.064 9	—	154.9	—	—	196.8
ZL207	T1	2.80	—	0.053	—	96.3	—	—	113

表 2.12-20b Al-Cu 合金的物理性能（2）

合金代号	热处理状态	线胀系数 α /10^{-6}K^{-1}			比热容 c/J·(kg·K)$^{-1}$			
		20~100℃	20~200℃	20~300℃	100℃	200℃	300℃	400℃
ZL201	T4	19.51	21.87	—	837.4	963.0	1 046.0	1 130.4
ZL201A	T5	23.36	23.76	26.4	879	1 122	733	—
ZL202	T6	23	—	—	837.4	921.1	1 004.8	1 088.6
ZL203	T5	23	—	—	837.4	921.1	1 004.8	1 088.6
ZL204A	T6	22.03	22.63	27.31	—	—	—	—
ZL205A	T5	22.6	24.0	27.6	888	913	934	—
	T6	21.9	23.0	25.9	888	903	925	—
	T7	—	—	—	—	—	—	—
ZL206	T7	20.6	22.8	23.9	—	—	—	—
ZL207	T1	23.6	—	26.7	—	—	—	—

表 2.12-21a Al-Mg 合金的物理性能（1）

合金代号	密度 ρ/g·cm^{-3}	线胀系数 α /10^{-6}K^{-1}			比热容 c/J·（kg·K）$^{-1}$			
		20～100℃	20～200℃	20～300℃	100℃	200℃	300℃	400℃
ZL301	2.55	24.5	25.6	27.3	1 046.7	1 046.7	1 088.6	—
ZL303	2.60	20	24	27	963.0	1 004.8	1 048.7	1 130.4

表 2.12-21b Al-Mg 合金的物理性能（2）

合金代号	熔化温度范围 /℃	热导率 λ/W·（m·K）$^{-1}$					电阻率 ρ /$\mu\Omega$·m	电导率 γ /%IACS
		25℃	100℃	200℃	300℃	400℃		
ZL301	452～604	92.1	96.3	100.5	108.9	113.0	0.091 2	21
ZL303	550～650	125.6	129.8	134.0	138.2	138.2	0.064 3	—

表 2.12-22 Al-Zn 合金的物理性能

合金代号	密度 ρ /g·cm^{-3}	熔化温度范围 /℃	热导率 λ(25℃) /W·（m·K）$^{-1}$	电阻率 ρ /$\mu\Omega$·m	电导率 γ /%IACS	线胀系数 α /10^{-6}K^{-1}			比热容 c /J·（kg·K）$^{-1}$
						20～100℃	20～200℃	20～300℃	100℃
ZL401	2.95	545～575	—	—	—	24.0	25.5	27.0	—
ZL402	2.81	570～615	138	0.049 3	40	23.6	—	25.6	963

表 2.12-23 铸造铝合金性能比较

合金代号	强度	耐热性/℃≤	耐蚀性	铸造流动性	气密性	抗裂纹倾向	抗气孔倾向	可切削性	焊接性
ZL101	C	200	C	A	A	A	B	C	B
ZL102	D	200	B	A	A	A	C	E	B
ZL104	C	200	C	A	B	A	C	C	C
ZL105	C	230	C	B	B	B	B	B	B
ZL106	B	250	C	A	A	A	B	B	B
ZL107	A	250	D	B	B	B	B	B	B
ZL108	B	250	C	A	A	A	C	D	C
ZL109	B	250	C	B	B	A	B	D	C
ZL111	A	250	D	B	A	A	B	B	B
ZL201	A	300	E	C	C	D	C	B	B
ZL202	C	250	E	C	C	D	C	A	B
ZL203	B	200	D	D	C	E	C	B	B
ZL301	A	200	A	C	E	C	C	B	C
ZL303	D	220	B	C	D	C	C	B	B
ZL401	B	200	C	A	B	B	C	B	B
ZL402	B	150	B	B	B	C	C	A	C

注：A—优；B—良；C—中等；D—次等；E—劣等。

充分发挥各种铸造合金的潜力在很大程度上取决于铸造技术，当使用铸造人员熟悉的合金和铸造方法时，常能得到既好又经济的铸件。

铸造铝合金的重要特点及用途见表 2.12-24。

表 2.12-24 典型铸造铝合金的特点和用途

类别	典型合金	主要特点	典型应用
铝硅合金	ZL102	铸造性能好，有集中缩孔，吸气性大，需变质处理，耐蚀性、焊接性好，可切削性差，不能热处理强化，强度不高，耐热性较低	适于铸造形状复杂，耐蚀性和气密性高，承受较低载荷，≤200℃的薄壁零件，如仪表壳罩、盖及船舶零件等
	ZL105、ZL105A	铸造工艺性能和气密性良好，无热裂倾向，熔炼工艺简单，不需要变质处理，可热处理强化，强度高，塑性、韧性低，焊接性能和可切削性能良好，耐热性、耐蚀性能一般，ZL105A 的 Fe 含量较少，加 Ti 细化晶粒	在航空工业中应用广泛，适于铸造形状复杂，承受较高静载荷，工作温度在 225℃以下的零件，如汽缸体、盖，发动机曲轴箱等

续表 2.12-24

类别	典型合金	主要特点	典型应用
铝硅合金	ZL108	密度小，线胀系数小，导热率高，耐热性好，铸造工艺性能良好，气密性高，线收缩小，可得到尺寸精确铸件，无热裂倾向，强度高，耐磨性好，需变质处理	常用于铸造汽车、拖拉机的活塞和其他工作温度低于250℃的零件
铝铜合金	ZL201、ZL201A	铸造性能良好，热裂、缩孔倾向大，气密性低，可热处理强化，室温强度高，韧性好，耐热性能高，可焊接、可切削性能好，耐蚀性能差。ZL201A为杂质控制严的优质合金	用于工作温度在300℃以下承受中等载荷，中等复杂程度的飞机受力铸件，亦可用于低温承力件，用途广泛。ZL201A用作品高强度铸件
	ZL203	铸造工艺性能差，热裂倾向大，不需变质处理，可热处理强化，有较高的强度和塑性，可切削性好，耐热性一般，在人工时效状态耐蚀性差	制造形状简单，中等静载荷或冲击载荷，工作温度低于200℃的小零件，如支架、曲轴等
	ZL207	耐热性高，可在300～400℃下长期工作，为目前耐热性最好的铸造铝合金。结晶范围小，充填能力好，热裂倾向小，气密性高，不能热处理强化，室温力学性能较低，焊接性能好，耐蚀性较低	制造铸造形状复杂，在300～400℃长期工作，承受气压和液压的零件
铝镁合金	ZL301	铸造性能差，气密性低，熔炼工艺复杂，可热处理强化，耐热性不高，有应力腐蚀倾向，焊接性差，可切削性能好，其最大优点是耐大气和海水腐蚀	用于承受高静载荷或冲击载荷，工作温度低于200℃长期在大气或海水中工作的零件，如水上飞机，船舶零件
	ZL303	铸造性能较ZL301好。耐蚀性良好，接近ZL301。可切削性为铸造铝合金中最佳者，焊接性能好，热处理不能明显强化，室温力学性能较低，耐热性一般	制造低于200℃以下承受中等载荷的耐蚀零件，如海轮零件，航空或内燃机车零件
	ZL305	ZL301的改型合金，提高了合金的自然时效稳定性和抗应力腐蚀能力。加有微量Be，提高了熔铸过程中的抗氧化能力	与ZL301基本相同，但工作温度不宜超过100℃
铝锌合金	ZL401	铸造性能优良，需进行变质处理，在铸态下具有自然时效能力，不经热处理可达到高的强度，耐蚀性低，可采用阳极氧化处理提高耐蚀性能	适用于大型、形状复杂、承受高静载荷、不进行热处理、工作温度不超过200℃的铸件，如汽车、仪表、医疗器械零件等
	ZL402	铸造性能良好，铸造后有自然时效能力，可获得较高的力学性能，耐蚀性能良好，耐热性能低，焊接性一般，可加工性能良好	高静载荷或冲击载荷、不进行热处理的铸件，如空气压缩机活塞，精密仪表零件等

2　铸造铝合金物理冶金基础

铸造铝合金的性质和成分、组织以及状态有关，要想掌握铸造铝合金的铸造性能、使用性质，必须对其合金元素（化学成分）作用、组织结构以及状态进行研究。

与变形铝合金相比，铸造铝合金的力学性能不如变形铝合金，但有良好的铸造性能，可以浇注成形状复杂的零件。在生产过程中，不需庞大的加工设备，还有节约金属、降低成本、减少工时等优点，因此获得了广泛的应用。

铸造铝合金的化学成分规定范围见本章1.2节。与变形铝合金化学成分相比，其中显著差别的是硅，大部分变形铝合金（Al-Si系，Al-Mg-Si系除外）中均作为杂质对待，而在铸造铝合金（Al-Cu系除外）中，则作为主要合金元素加入。加硅的目的是为了改善铸造性能。铁是铸造铝合金的主要杂质，它与铝形成针状的$FeAl_3$相，在有硅的铝合金中，则形成三元化合物α（Fe_2SiAl_8）相和β（$FeSiAl_5$）相。如果这些化合物相是粗大的、针状的，会严重地降低合金的力学性能，特别是合金的韧性，同时降低合金抗蚀性。如果能使含铁的这些化合物细化（变小或改变形状），这些危害性会减轻。锌（除Al-Zn合金）、锡、铅等在多数合金中都作为杂质对待。

铸造性能和铸造工艺性能是衡量铸造合金好坏的重要标识，如液态流动性、凝固收缩性、热裂倾向与气密性等，生产中对这些都有要求和指标。众所周知，这些性能好坏取决于所用合金的化学成分、物理性能、化学性能和铸造条件等因素。

铝合金在液态下很容易吸收气体，主要是氢气。在其冷却过程中又析出来。由于合金液体在凝固过程中黏性增大等原因，这些气体不能完全排除在铸件之外，形成细小而分散的气孔（针孔）。对铝合金铸件针孔的大小，在技术标准中都有规定。针孔往往与疏松同时存在，且不易分辨。

应当指出，铸造工艺条件很重要，对于铸造性能不好的合金，如果采取一定的工艺措施，也能得到合格的铸件。

2.1　铝硅系铸造铝合金

2.1.1　铝硅系合金状态图

铝硅系合金状态图见图2.12-2。

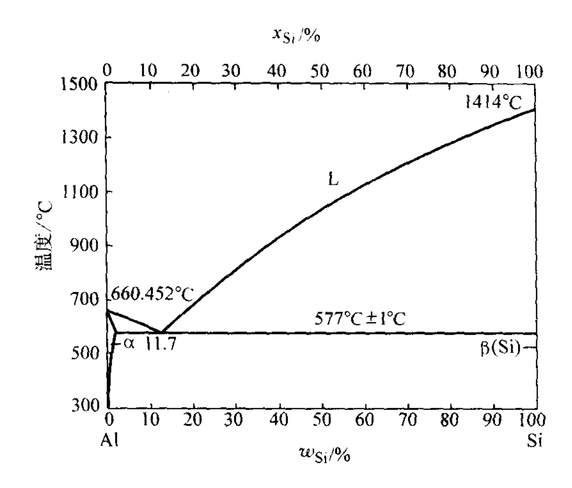


图 2.12-2 Al-Si 系合金状态图

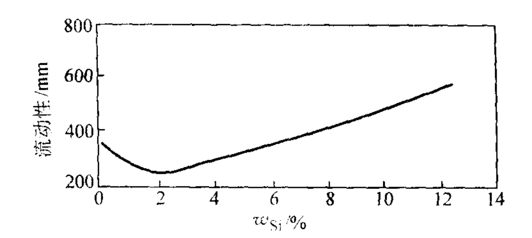


图 2.12-3 硅含量对 Al-Si 合金流动性的影响

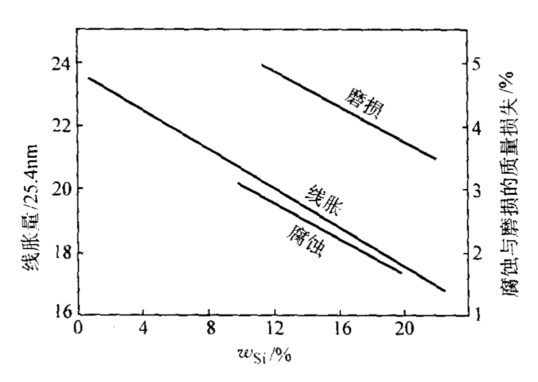


图 2.12-4 硅含量对 Al-Si 合金使用性能的影响

Al-Si 系合金是共晶类型合金，共晶反应温度为 577℃，共晶点成分为 11.7%Si，共晶温度时硅在铝中的溶解度为 1.65%，溶解度随温度降低而减少，室温下仅为 0.05%Si。共晶反应为 L→α+β，α 为铝基固溶体，β 为硅基固溶体。由于铝在硅中溶解很少，一般就称 β 相为 Si 相。

硅是 Al-Si 系合金的主要成分，其成分范围为 4%～13%，少数合金含 Si 量达到 20%以上。加硅的目的是为了改善合金的流动性（共晶成分流动性最好见），使合金有良好的致密性和可焊性。

Al-Si 系合金共晶成分未变质处理的金相组织。硅呈粗大针状存在，严重地影响着合金的性能。这种组织的合金作为铸造铝合金零件是不能使用的。

1921 年发现变质处理方法，在合金中加入少量 Na 或 NaF 等混合物（叫作变质剂），细化和改变了硅的形态，提高了合金的性能，才获得广泛的应用。含 3%～14% Si 的 Al-Si 合金变质处理对力学性能均有明显效果，金属型铸造比砂型铸造的更好，强度和伸长率均有很大的提高，使本来不能用于工业生产的合金，可以浇注铝合金铸件了。这是由于变质处理可使共晶体中粗大的针状的硅变成细小的球状的硅，同时增加初生α(Al)固溶体体积分数所致（关于变质处理见本章 3.1.3 节）。

2.1.2 工业用 Al-Si 系合金

Al-Si 合金具有极好的流动性，小的铸造收缩率、小的线胀系数和良好的焊接性、抗蚀性以及足够的力学性能。但合金的致密性较小，适宜制造致密度要求不太高的形状复杂的铸件。硅对 Al-Si 合金流动性、耐磨性、抗蚀性等使用性能的影响见图 2.12-3 和图 2.12-4。

ZL102 合金是典型的二元共晶铝硅合金，合金中含硅量为 10%～13%，该合金具有优良的铸造性能，但虽经变质处理力学性能和可切削加工性能均较差。此外，合金吸气倾向大，铸件容易形成针孔。铸造组织中有粗大的针状硅与 α 固溶体形成的共晶体和少量的板块状初生硅，必须变质处理后使用。为了改善 ZL102 合金的室温和高温力学性能，加入一定量的镁、铜和锰等元素，构成 ZL108 合金。ZL108 合金热胀系数小，耐磨。ZL109 合金比 ZL108 合金含铜量低，提高了含镁量，用镍代替锰，提高了耐热性。ZL108 和 ZL109 合金广泛地用做内燃机的活塞，YL102 和 YL108 是压铸合金，用做压铸件。

亚共晶铝硅合金中属 Al-Si-Mg 系的有 ZL101、ZL101A、ZL104、YL104、ZL114A、ZL115 和 ZL106。它们之间在成分上主要区别是 ZL104 加有锰，ZL115 加入锌和锑，ZL116 加入钛和铍，ZL101A 和 ZL114A 对杂质要求很严。Al-Si-Mg 系合金具有良好的铸造性能、中等的力学性能和良好的抗蚀性。属 Al-Si-Cu 系的有 ZL105、ZL105A、ZL106、ZL110、ZL111，以上合金含有镁，ZL107、YL112 和 YL113 三个合金无镁，但铜偏高。除此之外，ZL106 和 ZL111 合金中加少量锰和钛，ZL110 合金中含铜量高含镁量低。Al-Si-Cu 系合金具有良好的铸造性能和中等的力学性能，抗蚀性比 Al-Si-Mg 系合金差些。这些合金适用于砂型、金属型和精密铸造，YL112 和 YL113 是压力铸造合金，做压铸零件用。

Al-Si 过共晶合金 YL117 中，含硅量为 18%左右，相当于美国的 390.00 合金，德国的 KS281 合金。ZL117 和德国的 KS280 合金中含硅量在 21%左右，还有含硅量更高的合金。这类合金随含硅量的增加密度减小，线胀系数降低，硬度、耐磨性和体积稳定性提高，主要用于生产活塞。其缺点是切削加工困难，需要耐磨的刀具。Al-Si 系合金，除 ZL102 外，均为热处理可强化合金。其强化相主要是 Mg_2Si 和 Al_2Cu。

Al-Si 系铸造铝合金室温典型性能见表 2.12-25。

表 2.12-25 Al-Si 系合金室温典型性能

合金代号	铸造方法	热处理状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ_5/%	抗压屈服强度 $\sigma_{-0.2}$/MPa	硬度 HBS	抗剪强度 τ_b/MPa	旋转弯曲疲劳强度 σ_{-1}/MPa	弹性模量 E/GPa
ZL101	S	F	165	125	6.0	—	—	—	—	—
		T1	170	140	2.0	145	60	140	55	72.5
		T4	200	110	4.0	—	55	150	45	70
		T5	220	120	4.0	—	—	—	—	—
		T6	225	165	3.5	170	70	180	60	72.4
		T7	235	205	2.0	215	75	165	60	72.4

续表 2.12-25

合金代号	铸造方法	热处理状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ_5/%	抗压屈服强度 $\sigma_{-0.2}$/MPa	硬度 HBS	抗剪强度 τ_b/MPa	旋转弯曲疲劳强度 σ_{-1}/MPa	弹性模量 E/GPa
ZL101	J	F	180	125	5.0	—	—	—	—	—
		T1	185	140	2.0	—	—	—	—	—
		T5	230	140	4.0	—	70	—	—	—
		T6	275	185	5.0	185	90	220	90	72.4
		T7	225	165	5.0	185	70	170	75	72.4
ZL101A	S	F	160	90	7.0	—	—	—	—	—
		T1	180	125	3.0	—	—	—	—	—
		T6	260	195	6.0	—	70	—	—	—
	J	T6	285	205	12.0	—	80	—	—	—
ZL102	SB	F	175	80	6.0	—	55	125	40	68.6
ZL104	S	T6	255	195	4.0	—	70	—	—	68.6
ZL105	S	F	160	85	3.0	—	—	—	—	—
		T1	195	160	1.5	165	65	150	55	70
		T6	240	170	3.0	180	80	195	60	70
		T7	260	250	0.5	160	85	195	70	70
	J	T1	205	165	2.0	165	75	165	—	70
		T6	295	185	4.0	185	90	235	70	70
		T7	275	205	2.0	205	85	205	70	—
ZL105A	S	T6	270	200	5.0	—	85	—	—	—
	J	T6	330	195	10.0	—	90	—	—	—
ZL107	S	F	185	125	2.0	130	70	150	70	74
		T5	205	180	1.5	185	80	165	75	74
		T6	245	165	2.0	170	80	200	75	74
	J	F	185	125	2.0	130	70	150	70	—
		T6	275	185	3.0	185	95	—	—	—
ZL109	J	T1	250	195	—	195	105	195	95	—
		T6	325	295	—	295	125	250	—	—
ZL111	J	T6	380	285	6.0	290	100	260	115	—
ZL114A	S	T6	315	250	3.0	240	85	285	85	—
	J	T6	345	275	10.0	275	85	295	110	—
ZL116	S	T4	280	—	5.0	—	75	—	—	—
		T5	330	280	3.0	—	90	—	75	76
	J	T4	300	—	7.0	—	85	—	—	—
		T5	360	—	5.0	—	95	—	—	—
ZL117	J	T6	255 ~ 305	—	0.4 ~ 1.0	—	130 ~ 150	—	—	—
		T7	235 ~ 295	—	0.3 ~ 0.8	—	120 ~ 130	—	—	—
YL102	Y	F	215	115	1.8	—	—	—	—	—
YL112	Y	F	330	165	3.0	—	80	215	145	71
YL113	Y	F	325	170	1.0	—	80	205	145	71
YL117	Y	F	317	250	< 1.0	—	120	—	140	—

2.2 铝铜系铸造铝合金

2.2.1 铝铜系二元合金状态图

铝铜系二元合金状态图见图 2.12-5。

由图 2.12-5 可知，靠铝部分铝和铜形成化合物$CuAl_2$（θ）相。α(Al)-$CuAl_2$ 于 548℃共晶反应[L→α(Al) + $CuAl_2$]，共晶成分为 33.2% Cu，共晶体为α(Al) + $CuAl_2$。$CuAl_2$ 在α(Al)中最大溶解度（548℃）为 5.7% Cu。$CuAl_2$ 随温度降低而溶解度变小，室温时铜在铝中的溶解度很小。因此，Al-Cu 系合金可以通过淬火时效来提高力学性能（即有热处理强化效应）（参见本篇第 2 章 4.3 节）。

2.2.2 工业用铝铜系合金

工业上应用的 ZL202 和 ZL203 合金仅含铜，ZL202 合金含

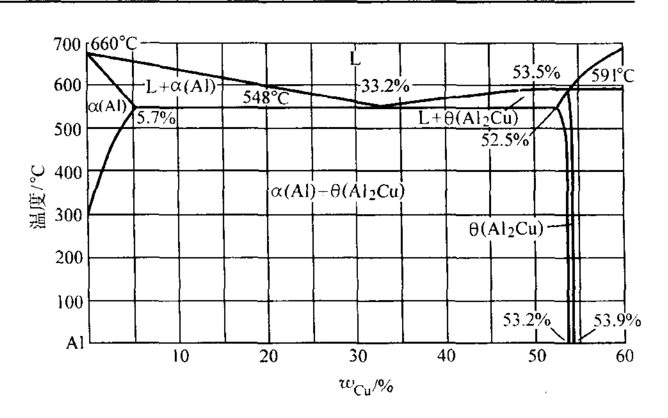
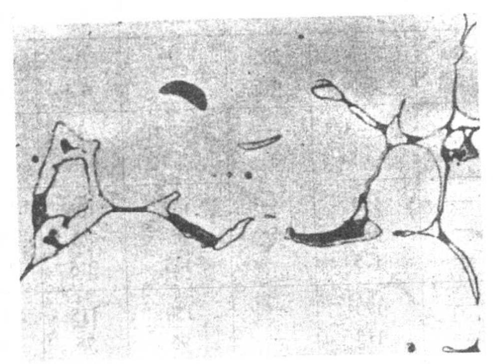
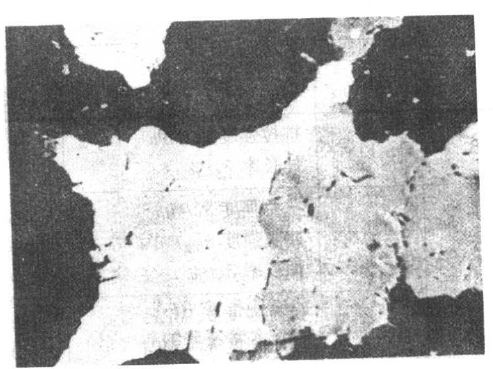


图 2.12-5　Al-Cu 系二元合金状态图

铜量为9%～11%，而ZL203合金含铜量为4%～5%，其铸造组织见图2.12-6。除大量的α(Al)固溶体外，晶界处存在着α(Al)+θ共晶体，由于共晶体中的α(Al)与基体无法区别，晶界上仅能见到θ相（见图2.12-6a）。



(a) 铸造组织



(b) 固溶处理后的组织

图2.12-6　ZL203合金铸造组织

加热到完全形成α(Al)固溶体温度，保持一定时间，θ相即溶解获得均匀的α固溶体，此时淬火（固溶处理），可把高温组织固定下来（见图2.12-6b）。该合金有自然时效倾向，随着时间的延长，强度和硬度提高。

这类合金热裂倾向较大，抗蚀性较差，有晶间腐蚀和应力腐蚀倾向。

如果向Al-Cu系合金中加入少量的锰和钛，构成复杂合金ZL201。ZL201A合金要求纯度高。加镉获得ZL204A；加入微量的锆、钒和硼形成ZL205A合金，含少量稀土的是ZL209合金。这些合金的特点是具有较高的力学性能。其中ZL205A-T6合金抗拉强度规定（标准HB 962—2001）超过490 MPa。

在Al-Cu合金基础上加稀土、锰和锆构成ZL206合金。除上述三种元素外再加入硅和镁，又构成ZL207合金。加入镍、钴、锆、锑和钛，构成ZL208合金。加这么多种元素的目的是形成复杂的化合物相，在晶界上阻止变形，提高耐热性，其工作温度可高达400℃。

铝铜系铸造铝合金的典型室温力学性能见表2.12-26。高温瞬时力学性能见表2.12-27。低温瞬时力学性能见表2.12-28。

表2.12-26　Al-Cu合金的典型力学性能

合金代号	铸造方法	热处理状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ_5/%	抗压屈服强度 $\sigma_{-0.2}$/MPa	硬度 HBS	抗剪强度 τ_b/MPa	旋转弯曲疲劳强度 σ_{-1}/MPa	冲击韧度 a_{KU}/kJ·m^{-2}
ZL201	S	T4	325	160	10	—	90	—	70	261
		T5	360	215	5.0	—	100	—	70	78
ZL201A	S	T4	365～370	—	17～19	—	100	—	—	147～245
		T5	440～470	255～305	8～15	275～285	120	—	90	
ZL202	S	F	165	105	1.5	—	—	—	—	—
		T6	285	270	0.5	295	115	220	60	
	J	T6	330	250	—	250	140	250	62	—
ZL203	S	T4	220	110	8.5	115	60	180	50	—
		T6	250	165	5.0	170	75	205	50	—
ZL204A	S	T5	440	395	5.2	—	140	340	70～90	78
ZL205A	S	T5	480	345	13	—	140	345	90	126
		T6	510	430	7	—	150	345	85	82
		T7	495	455	3.4	—	140	—	—	54
ZL206	S	T6	365	305	1.8	—	135	265	85	18
ZL207	S	F	170	—	1.0	—	85	—	—	—
		T1	190	—	0.5	—	90	—	—	
	J	F	195	—	1.6	—	85	—	—	—
		T1	215	—	1.3	—	85	—	—	
ZL208	S	T7	290	210	1.8	—	—	—	—	—
ZL209	S	T6	485	445	2.5	—	150	330	—	—

表 2.12-27 Al-Cu 合金高温瞬时力学性能

合金代号	铸造方法	热处理状态	性能	温度/℃							
				24	100	150	175	200	250	300	350
ZL201	S	T4	抗拉强度 σ_b/MPa	335	320	305	285	275	215	150	—
			伸长率 δ_5/%	12.0	12.2	8.0	9.5	7.5	6.5	10.0	—
ZL201A	S	T5	抗拉强度 σ_b/MPa	—	—	365~375	—	295~315	—	—	—
			伸长率 δ_5/%	—	—	9~14	—	7~10	—	—	—
ZL202	S	F	抗拉强度 σ_b/MPa	165	—	150	—	145	105	45	—
			屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	105	—	90	—	85	70	30	—
			伸长率 δ_5/%	1.5	—	1.5	—	1.5	3.5	20.0	—
		T2	抗拉强度 σ_b/MPa	185	—	170	—	150	115	55	—
			屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	140	—	115	—	95	75	30	—
			伸长率 δ_5/%	1.0	—	1.0	—	1.5	3.0	14.0	—
		T6	抗拉强度 σ_b/MPa	285	270	250	—	165	115	60	—
			屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	275	260	240	—	115	75	35	—
			伸长率 δ_5/%	0.5	0.5	1.0	—	2.0	6.0	14.0	—
ZL203	S	T4	抗拉强度 σ_b/MPa	220	205	195	—	105	60	30	—
			屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	110	105	140	—	60	40	20	—
			伸长率 δ_5/%	8.5	5.0	5.0	—	15.0	25.0	75.0	—
		T6	抗拉强度 σ_b/MPa	250	235	195	—	105	60	30	—
			屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	165	160	140	—	60	40	20	—
			伸长率 δ_5/%	5.0	5.0	5.0	—	15.0	25.0	75.0	—
ZL204A	S	T5	抗拉强度 σ_b/MPa	480	—	395	—	325	230	155	—
			屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	395	—	340	—	290	205	130	—
			伸长率 δ_5/%	5.2	—	3.8	—	2.6	2.5	3.1	—
ZL205A	S	T5	抗拉强度 σ_b/MPa	480	—	380	—	345	255	165	—
			伸长率 δ_5/%	13	—	10.5	—	4	3	3.5	—
		T6	抗拉强度 σ_b/MPa	510	—	415	—	355	240	175	—
			伸长率 δ_5/%	7	—	10.5	—	4	3	3.5	—
		T7	抗拉强度 σ_b/MPa	495	—	400	—	345	—	—	—
			伸长率 δ_5/%	3.4	—	5.5	—	4.5	—	—	—
ZL206	S	T6	抗拉强度 σ_b/MPa	365	—	—	—	315	225	160	125
			屈服强度 σ_b/MPa	310	—	—	—	270	185	120	95
			伸长率 δ_5/%	1.8	—	—	—	1.9	3.2	6.2	9.3
ZL208	S	T7	抗拉强度 σ_b/MPa	—	—	—	—	—	135	85	50
ZL209	S	T6	抗拉强度 σ_b/MPa	—	—	—	—	340	275	—	—
			伸长率 δ_5/%	—	—	—	—	2.4	2.4	—	—

表 2.12-28 Al-Cu 合金低温瞬时力学性能

合金代号	铸造方法	热处理状态	性 能	温度/℃						
				-269	-253	-196	-80	-70	-40	-28
ZL201	S	T4	抗拉强度 σ_b/MPa	—	—	—	—	300	—	—
			伸长率 δ_5/%	—	—	—	—	10.0	—	—
ZL204A	S	T5	抗拉强度 σ_b/MPa	—	—	—	—	490	485	—
			伸长率 δ_5/%	—	—	—	—	6.5	4.7	—
ZL205A	S	T5	抗拉强度 σ_b/MPa	—	—	—	—	500	480	—
			伸长率 δ_5/%	—	—	—	—	8	8	—
		T6	抗拉强度 σ_b/MPa	—	—	—	—	520	510	—
			伸长率 δ_5/%	—	—	—	—	3	3	—
ZL209	S	T6	抗拉强度 σ_b/MPa	—	—	—	—	—	460	—
			伸长率 δ_5/%	—		—	—	—	1.5	—

2.3 铝镁系铸造铝合金

2.3.1 铝镁系二元合金状态图

铝镁系二元合金状态图见图2.12-7。

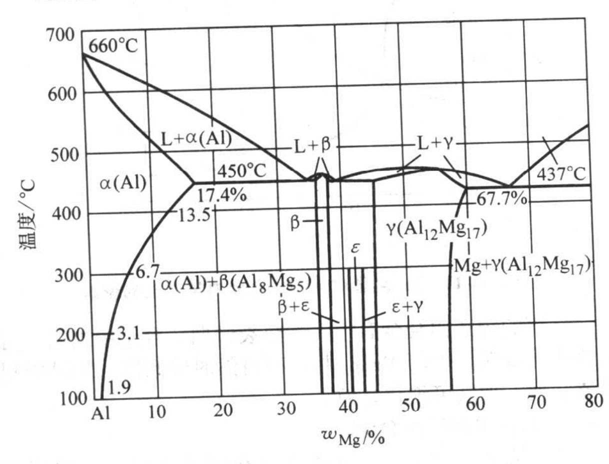


图2.12-7 Al-Mg系二元合金状态图

由图2.12-7可知，富镁部分铝和镁形成β(Mg_5Al_8)相，与α(Al)固溶体发生共晶反应，共晶体由α(Al)+β(Mg_5Al_8)构成。镁在铝中最大溶解度为17.4%，室温时溶解度小于1.9%。虽然形成Mg_5Al_8化合物，而镁在铝中的溶解度大又随温度变化，但是，除固溶强化外，淬火时效后沉淀相形核困难，核心少，尺寸大，时效效应小，一般不被工业所重视。镁对Al-Mg合金力学性能的影响见表2.12-29。

表2.12-29 Mg含量对Al-Mg合金力学性能的影响

w_{Mg}/%	热处理状态	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ /%	硬度HB
5	F T4	145～165 165～175	5～7 6～8	50～55 55～60
7	F T4	155～175 195～215	2～4 6～10	60～65 65～70
9	F T4	165～185 195～245	1～2 8～12	65～70 70～80
11	F T4	155～165 295～390	0.5 12～15	75～80 85～95
13	F T4	145～165 345～440	0.3 12～25	80～85 90～100
14	F T4	165～195 225～275	0.3 1.5～3	80～85 95～105

Al-Mg合金是铸造铝合金中抗蚀性最好的合金，这是因为固态镁能全部溶解成为单相α固溶体合金，见图2.12-8，在腐蚀介质中不易发生电化学腐蚀。有少量细小的Mg_5Al_8阳极相，构成微电池，Mg_5Al_8阳极相被腐蚀掉后，铸件表面仍为单相α固溶体，使腐蚀过程中止。如果Al-Mg合金不进行固溶处理，Mg_5Al_8相存在于晶界处，会使合金有产生晶间裂纹及应力腐蚀倾向。

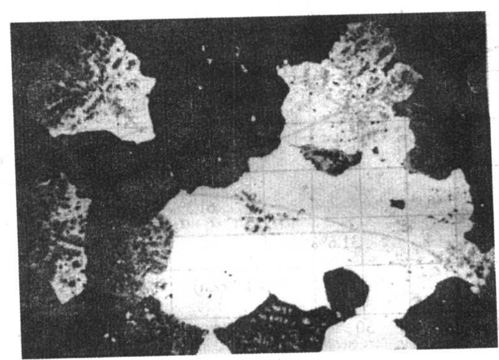


图2.12-8 ZL301合金金属型铸造T4处理后组织

镁的密度比铝的小，因此，Al-Mg合金是密度最小的合金。镁对Al-Mg合金密度的影响见图2.12-9。

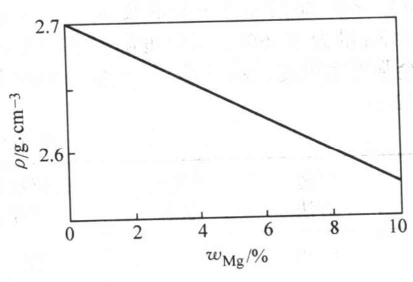


图2.12-9 Mg含量对Al-Mg合金密度的影响

2.3.2 工业用铝镁系合金

铝镁系铸造铝合金牌号不多，主要有ZL301、ZL303和ZL305。ZL301合金含镁量为9.5%～11.0%，成分简单，可以处理成单相α固溶体合金（见图2.12-8)。该合金在硫化氰酸铝、弱碱溶液、海水中抗蚀性比纯铝和其他铝合金高。在硝酸铵、氨、氢氧化钙、明矾、过氧化氢、硫化氢、硫化铵、硫化钾、碳酸铵、碳酸钾、碳酸镁等20℃的溶液中以及在潮湿的大气中，具有与纯铝相近的抗蚀性。

ZL303合金中加4.5%～5.5%Mg外，还加入0.8%～1.3%Si；形成Mg_2Si相和β（Mg_5Al_8）相。加入0.1%～0.4%Mn在有铁存在时形成AlFeMnSi相（骨骼状)，减少铁的有害影响。ZL305合金中含7.5%～9.0%Mg，还加入1.0%～1.5%Zn，锌能溶解在α固溶体和β相中，抑制镁原子扩散，阻滞β相析出，提高抗蚀性。加0.1%～0.2%Ti细化晶粒，为了减少熔炼的氧化，有时加少量Be。ZL303和ZL305合金共同特点是具有好的抗蚀性。

铝镁系铸造铝合金室温典型力学性能见表2.12-30。

表2.12-30 Al-Mg合金室温典型性能

合金代号	铸造方法	热处理状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ_5/%	硬度HB	疲劳强度 σ_{-1}/MPa	弹性模量 E/GPa	冲击韧度 a_{KU}/kJ·m^{-2}
ZL301	S	T4	295	165	11	70	50	68.6	98
ZL303	S J	F F	165 195	100 —	3 5	65 70	— —	66 —	— —
ZL305	S	T4	300	—	9	—	—	—	—

2.4 铝锌系铸造铝合金

2.4.1 铝锌系二元合金状态图

铝锌系二元合金状态图见图2.12-10。

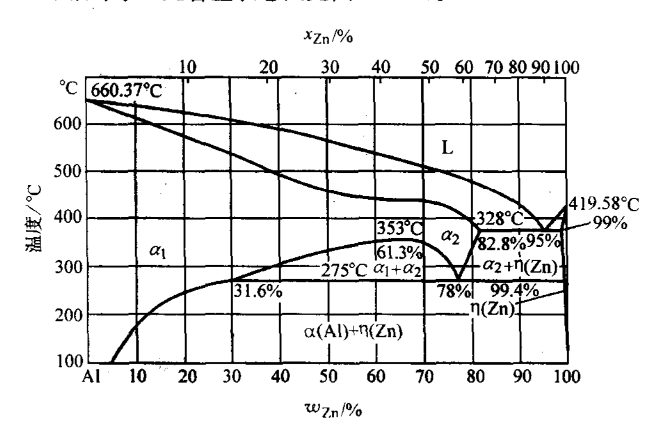


图2.12-10 铝锌系二元合金状态图

锌与铝不形成化合物，最大溶解度（382℃）为82.8% Zn。在275℃ 78% Zn时发生共析转变 $\alpha_2 \rightarrow \alpha_1 + \eta$ (Zn)。α_1 固溶体中含Zn量为31.6%。溶解度随温度变化而改变。锌提高铝合金强度和硬度，Zn含量对Al-Zn合金的力学性能影响见图2.12-11。

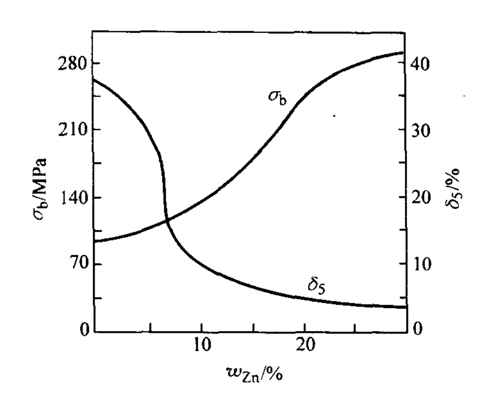


图2.12-11 Zn含量对Al-Zn合金力学性能的影响

含锌的铸造铝合金有很大的热裂倾向。合金中加镁，可形成强化效果显著的 $MgZn_2$ 相，有自然时效倾向。加硅能提高流动性，加钛可细化晶粒。

2.4.2 工业用铝锌系合金

锌铝铸造合金不多。这类合金在铸造状态下室温保持20~30 d，即可充分强化。当铸造凝固快时有显微偏析。如果铸件性能不均时，可用淬火时效处理改善。加Si为了提高流动性，加镁等为了提高强度和耐热性。

锌铝铸造合金室温力学性能见表2.12-31。

除以上四个合金系的铸造铝合金外，近些年在合金系，合金品种方面都有长足的发展。如铝锂系合金，密度小，弹性模量大，可降低结构质量，提高结构件刚度10%~15%。此外，还可降低疲劳裂纹扩展速率。这类合金目前应用较少，尚在推广应用之中。

表2.12-31 Al-Zn合金室温典型性能

合金代号	铸造方法	热处理状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ_5/%	硬度HBS	疲劳强度 σ_{-1}/MPa	弹性模量 E/GPa
ZL401	S、R	T1	215	100	3	65	65	69
	J	T1	255	—	5	70	—	—
ZL402	S	T1	240	170	9	70	60	71
	J	T1	220	150	4	75	—	—

铸造铝基复合材料发展较快，它具有比强度大、比模量高、耐磨、耐温，并还具有密度和线胀系数小，高温蠕变和疲劳强度良好等特点。铝基复合材料添加物为SiC、TiC、Al_2O_3 和C颗粒、晶须或纤维等，采取液态金属搅拌使添加物均匀后铸造。

半固态铸造铝合金。这种技术是先制坯料，然后再利用流变铸造或触变铸造或射流铸造等方法制成零件。它有成形温度低、铸件致密、加工余量少、模具寿命长和节省能源等优点。

3 铸造铝合金生产

3.1 熔炼基本原理

3.1.1 熔炼过程中的基本问题

1）合金化 除熔炼纯铝以外，熔炼铝合金要加入其他合金元素，使其与铝形成固溶体或化合物，达到合金的物理的、化学的及力学的要求。熔炼是制成合金的一种手段。由于合金元素的熔点有高有低，与铝形成合金的物理－化学性质各不相同，根据合金状态图及合金元素性质来判断采取熔炼合金的设备及工艺。

2）氧化 熔炼是在高温金属熔融状态下进行的，除真空熔炼外，均与大气接触，铝又和氧亲和力大，必然会氧化，形成 Al_2O_3。这是一层致密的氧化膜，连续地覆盖在铝的表面上，能起保护作用，防止铝继续氧化，因此在熔炼过程中，尽量避免搅动破坏氧化膜。

由于合金中还有其他合金元素，也会氧化。如果在合金表面上生成的含合金元素的氧化膜，看其氧化膜的分子体积与铝的原子体积的比，氧化膜的分子体积大于铝的原子体积，膜致密，有保护作用。相反，则保护作用减小。

3）吸气 在熔炼过程中，铝合金不仅与氧接触，也与其他气体，如氢、氮等接触发生作用，主要是吸附和扩散作用，即通常所说的溶解。实际上在铝合金中溶解的气体主要是氢。氢在铝中的溶解度变化见图2.12-12。

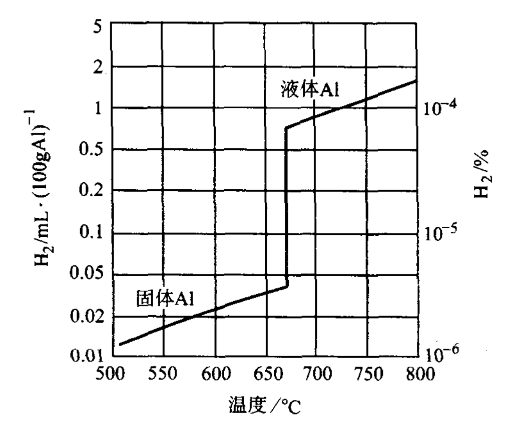


图2.12-12 氢在铝中的溶解度变化

氢在铝中的扩散速度随着金属温度的增高与气体压力的加大而迅速的增大。这一点在熔化铝合金时特别重要。

这些氢气在合金凝固的过程中，在一定的条件下能以气泡的形式析出。气泡的大小与温度和铝液体状况有关。如果金属液的温度高，黏度低，扩散速度较快，会以较大的气泡析出。气泡的运动速度取决于金属液的黏度、密度及气泡的大小。气体的析出通常在结晶前开始，并在整个结晶过程中继续着。气泡被成长着的晶体所包围或被拥到晶体间的空隙中。因此，针孔或气泡在铸件先凝固的部分是不存在的，而集中在最后凝固的部分里。在结晶温度间隔宽的合金铸件中，其枝晶的空间很快就析出气体，铸件产生分散针孔，而在结晶温度间隔窄的合金铸件中，针孔都集中在较晚凝固的部分。

应当注意，在熔炼浇注过程中，所接触的空气、炉料、浇注设备以及铸型中总是有水汽的，水汽遇着铝液发生下列反应：

$$2Al + 3H_2O \longrightarrow Al_2O_3 + 6[H]$$
$$2Al + 6H_2O \longrightarrow 2Al(OH)_3 + 3H_2$$
$$2Al(OH)_3 \longrightarrow Al_2O_3 + 3H_2O$$

4）非金属夹杂　非金属化合物，如氧化物、氮化物、硫化物等若干以较大颗粒的独立相存在于合金中，并对合金及铸件性质有影响，这些化合物被称为非金属夹杂，又称夹杂。在铝合金中的有 Al_2O_3、MgO、SiO_2 和 $Al_2O_3 \cdot MgO$（尖晶石）、氮化物、碳化物等。这些夹杂，有的是原辅材料、工艺过程带入的，有的是熔炼过程中产生的，都是应该清除的。

3.1.2　合金熔体净化

合金中气体、夹杂及其他非加入金属等，影响合金纯洁度，使铸件易产生气泡、针孔、夹杂、裂纹和硬质点等缺陷，还影响铸件铸造性能、力学性能、化学性能和外观品质等，因此，合金必须净化处理（精炼）。

净化从净化机理可分为吸附净化和非吸附净化。

（1）吸附净化

依靠精炼剂产生的吸附作用达到去除氧化夹杂和气体的目的。

1）浮游法

① 惰性气体法　利用氮、氩等惰性气体与铝和氢不起化学反应又不溶解于铝的特性，将氮气或氩气以小气泡形式吹入铝液中，小气泡从铝液体底部向上浮游。与氧化物夹杂相遇，夹杂被吸附在小气泡表面上，随小气泡上浮到熔体表面上被清除。惰性气体气泡中氢的分压为零，由于气泡与铝的界面上有氢的分压差，使溶于铝液中的氢不断地被吸入到气泡中，气泡浮出液面，气泡与氢都进入了大气之中。因此，惰性气体的小气泡上升过程中既带出了氧化物夹杂，也带出了氢气。其原理参见图 2.12-13 和图 2.12-14。

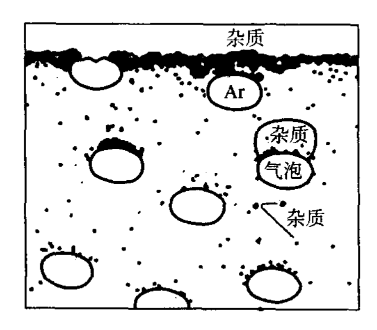


图 2.12-13　浮游除渣原理图

镁和氮易生成氮化镁，因此铝镁系合金不希望用氮气净化。

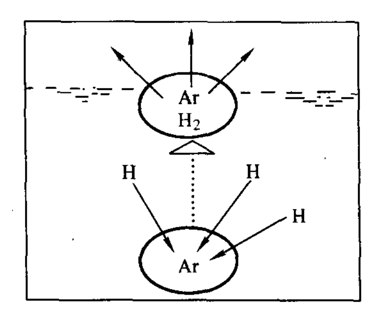


图 2.12-14　气泡除气原理图

② 活性气体法　对铝来说，活性气体主要是氯气，氯气又不溶于铝。但氯和铝及溶于铝液体中氢起作用，发生反应如下：

$$Cl_2 + H_2 \longrightarrow 2HCl\uparrow + 184.8\ kJ$$
$$3Cl_2 + 2Al \longrightarrow 2AlCl_3\uparrow + 1.6\ MJ$$

反应生成物 HCl 和 $AlCl_3$（沸点 183℃）都是气态，不溶于铝液。HCl、$AlCl_3$ 和未起反应的氯气一起起净化作用，其效果比惰性气体法好得多。氯气与钠起作用，有除钠效果。氯气也会和镁起反应，生成 $MgCl_3$，在液态铝中是气体，会损失部分镁，高镁的铝合金应注意这一现象。

③ 混合气体法　氯气净化效果好，但氯气对人身有害，对环境污染，对厂房设备腐蚀，因此采用 N_2—Cl_2 或 N_2—Cl_2—CO 混合气体净化。氮氯之比为 9∶1 或 2% ~ 5% Cl_2，N_2-Cl_2-CO 三者之比为 8∶1∶1。在铝液中有以下反应：

$$2Al_2O_3 + 6Cl_2 \longrightarrow 4AlCl_3\uparrow + 3CO_2\uparrow$$
$$O_2 + 2CO \longrightarrow 2CO_2\uparrow$$
$$Al_2O_3 + 3Cl_2 + 3CO \longrightarrow 2AlCl_3\uparrow + 3CO_2\uparrow$$

式中的 $AlCl_3$、CO_2 都起净化作用，还能分解 Al_2O_3，净化效果明显提高。

④ 氯盐法　采用二氯化锌（$ZnCl_2$）、二氯化锰（$MnCl_2$）、六氯乙烷（C_2Cl_6）、四氯化碳（CCl_4）和四氯化钛（$TiCl_4$）等，放入铝液体中，生成气体 $AlCl_3$ 起净化作用。加 $ZnCl_2$、$MnCl_2$ 和 $TiCl_4$ 有如下反应：

$$3ZnCl_2 + 2Al \longrightarrow 2AlCl_3\uparrow + 3Zn$$
$$3MnCl_2 + 2Al \longrightarrow 2AlCl_3\uparrow + 3Mn$$
$$3TiCl_4 + 4Al \longrightarrow 4AlCl_3\uparrow + 3Ti$$

式中 $AlCl_3$ 起净化作用。这三种物质用于工业生产，$ZnCl_2$ 易吸湿及四氯化钛不易保管，而 $MnCl_2$ 价格贵，应注意脱水。六氯乙烷为白色晶体，使用和保管较方便，加入铝液体中发生如下反应：

$$Al + C_2Cl_6 \longrightarrow Al + C_2Cl_4\uparrow + Cl_2\uparrow$$
$$2Al + 3Cl_2 \longrightarrow 2AlCl_3\uparrow$$
$$Al + C_2Cl_4 \longrightarrow Al + CCl_4 + C$$
$$Al + CCl_4 \longrightarrow Al + 2Cl_2\uparrow + C$$
$$H_2 + Cl_2 \longrightarrow 2HCl\uparrow$$

六氯乙烷在铝液中本身会气化（185.5℃升华）。用六氯乙烷（C_2Cl_6）净化，未作用完的 C_2Cl_4 和 Cl_2 逸出，有刺激性气味，污染环境，应装通气设备。

2）熔剂法　铝合金净化，主要用碱金属的氯盐和氟盐的混合物熔剂，用于净化的叫精炼剂。

精炼剂主体是氯化钠和氯化钾，再加入少量的氟盐（有时还加六氯乙烷）。这主要是靠熔剂熔化后吸附和溶解氧化夹杂净化。实践证明，氯化钠和氯化钾的混合物，对氧化铝有极强的润湿及吸附能力，在熔剂上浮时将氧化铝碎片带出。加少量氟盐提高熔剂分离性，增加对氧化铝的溶解能力，增强熔剂净化效果。加入少量六氯乙烷，更加强了净化

能力。

应注意，含镁量高的铝合金，熔剂中避免加入含氯的盐，如氯化钠（NaCl），因此采用氯化钾、二氯化镁和氟化钙组成的熔剂（精炼剂）。

精炼剂加入方法有：一是用钟罩压入铝液体内部；另一是用惰性气体吹入铝液体内部。

（2）非吸附净化（真空处理）

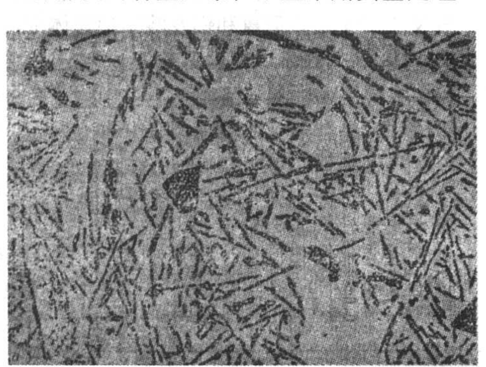
根据氢气在铝液体中溶解度与其分压的关系，在真空下铝液吸气的倾向趋于零，氢气会很快地析出，生成气泡在上浮过程中将非金属夹杂吸附在气泡表面上带出铝液，使铝液得到净化。真空处理分静态、动态两种处理方法。铝合金中如果加入易挥发的合金元素，不宜采用真空处理这一方法。

从熔体净化这个概念出发，现在采取的玻璃丝布过滤、微孔陶瓷板（管）过滤等等也应属于净化处理这一范畴。

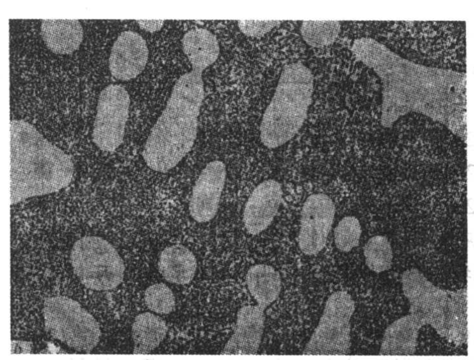
3.1.3　变质处理

变质处理、晶粒细化及初生相细化或改变形状含义各不相同，有时有人用变质处理一词概括了这些内容。

1）变质处理　简单二元 Al-Si 合金，如 ZL102 含 11%～13%Si。共晶成分为 11.7%Si，应该说 ZL102 是典型的共晶合金（铸造组织见图 2.12-15a）。其组织为粗大的针状（应为片层状）硅与 α 固溶体构成的共晶体和少量的板块状初晶硅（合金成分偏上限）。合金力学性能不高，抗拉强度 σ_b 不超过 140 MPa，伸长率 δ 小于 3%。



(a) 变质处理前



(b) 变质处理后

图 2.12-15　ZL102 合金变质处理前、后铸造状态组织

若浇注前向合金熔体中加入含 Na 或 NaF 的变质剂（2～3）%进行变质处理，变质处理后好像将共晶点向右共晶温度向下移动了（见图 2.12-16 中虚线），使本来为微过共晶合金变为亚共晶合金，初生硅消失、共晶体细化，出现了初生 α 固溶体（见图 2.12-15b）。其力学性能提高，抗拉强度 σ_b 达到 180 MPa，伸长率能超过 8%，甚至可以压力加工成板、带材。硅对 Al-Si 合金力学性能影响见图 2.12-17。

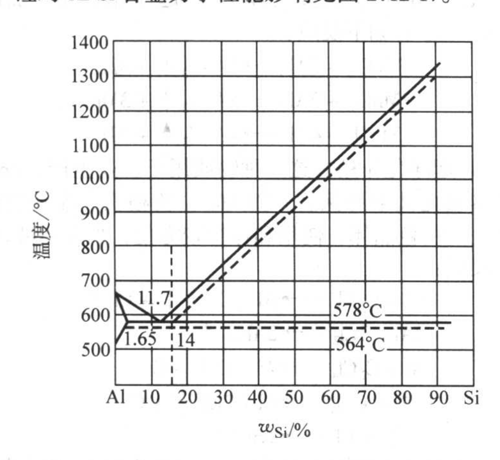


图 2.12-16　Al-Si 合金状态图

——未变质处理；-----变质处理

变质处理机理之一是，Al-Si 合金加 Na 后形成大量的 $(NaAl)Si_2$ 物质，可做 Si 的晶核。Na 阻碍硅长大，使结晶温度下降，铝表面张力减小，晶体以球状方式长大，造成共晶体细化，共晶体内硅为球形，本为过共晶成分的合金变成了亚共晶成分的金相组织。这与速冷和高压下结晶不同。

用钠盐作变质剂，易吸潮，不好保管，不容易控制加钠量，铸件易生成气孔，而且变质效果持续时间短，变质处理完成后，必须在 30 min 内浇注完了。

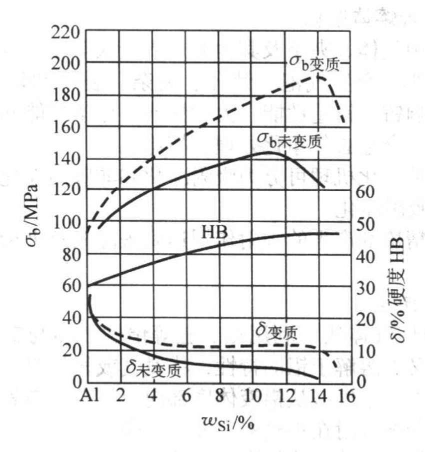


图 2.12-17　硅对 Al-Si 合金力学性能的影响

后来发现，不单是钠，锶也有相同的作用，而且有效期限很久，称为长效变质剂。钠也好锶也好，熔点低，易挥发氧化，不好保管。因此，用钠盐（NaF）或 Al-Sr 中间合金。显然，Al-Sr 中间合金优越，好保管，加入量容易控制，有效期长。

加磷与钠效果相反，本为共晶成分合金，获得的是过共晶组织，使块状硅数量增加，能提高合金的耐磨性。生产活塞的共晶类型铸造铝合金应该用磷变质处理。磷变质处理后的废料，应注意区分保管，因为钠与磷的作用正相反，用错料会造成事故，产品报废。

用锑进行变质处理，对合金铸造组织看不出很大的变化，类似未变质处理的组织，但经淬火时效后，组织发生显著变化，特别是合金的强韧性明显提高。提高韧性对铸造铝合金来讲，尤为重要。

2）细化晶粒　铝合金中加入少量钛，细化固溶体，既能提高合金性能，又能改善工艺性能。加钛细化合金组织这一工艺也有人称为变质处理。

晶粒细化剂必定是形核的促进剂。

金属及合金凝固成晶体时，有形核及长大过程。晶核的形成可分为均质自发形核与非均质形核。均质非自发形核是假定在整个熔体中均匀地产生晶核，而非均质形核是在容易生成晶核的地方优先产生晶核。均质形核，必须使整个熔体中有相同的过冷度。在实际生产中，是办不到的，总有的地方（如模壁）冷却得快，有的地方（如铸件心部）冷却得慢，过冷度就不相同，生核的时间就不一致，有先有后。生产中期望加一种不熔性物质，而且可做非自发晶核，使铸件获得均匀细小的组织。铝合金中加少量钛或加少量钛和硼，看来而且实际上就能达到这一目的。但不要忘记，冷却速度也是重要因素，冷却速度除对形核有影响外还可控制晶体的长大速度。把形核（包括外加晶核）和冷却速度一起考虑，才能正确地获得均匀细小的组织。

可做非均匀形核的化合物有：VC、TiC、$TiAl_3$、TiB_2、AlB_2、ZrC、NbC 和 W_2C 等。

3）改变初生相形态　铝合金组织中，经常存在初生的针状（片状）化合物相，对合金性能，特别是对力学性能有很大影响。如 Al_3Fe 为针状，使力学性能下降。如果使 Fe:Si=4:1，形成 AlFeSi 相，改变了形状，使力学性能，特别是伸长率得到明显改善。加锰也能改变含铁相的形状。

在 Al-Mg 合金中，镁含量高时，β（Mg_5Al_8）相以粗大形状存在晶界处，如不固溶化处理，力学性能和抗蚀性能不佳。但固溶化处理需时间很长，若加入少量锆，可细化 β 相，有利于热处理进行。

在铝合金中，偶而有低熔点金属（如 Pb、Sn、Bi 等）杂质存在，晶界变弱，温度稍高，晶界熔化。又如铝中含钠，发生"钠脆"。因此，加入少量稀土元素，使这些金属杂质变成化合物，可除去晶界中存在的这些问题。

可不可以这样说，在熔炼铸造过程中，向合金熔体中加入能改善合金组织；细化合金晶粒，改变初生相形状或清除晶界有害相，即能改善合金组织，改变有害相形状、大小和分布的元素，均称为变质剂，这种工艺均称为变质处理。

3.1.4　合金的流动性

流动性是取得高品质和形状复杂的铸件的重要条件。流动性好的合金，在较低的浇注温度下能填满铸型。测量合金流动性有规定方法，在水平的砂型中同时浇铸三根直径 5 mm 的试样，其长度就是流动性指标，其流动性与合金的成分、组织和结晶温度间隔有关，某些铸造铝合金的结晶温度间隔见表 2.12-32，流动性比较见表 2.12-33。

表 2.12-32　铸造铝合金的结晶温度

合金代号	液相线温度/℃	固相线温度/℃	温度差/℃
ZL101	620	577	43
ZL102	577	577	0
ZL103	616	577	39
ZL104	601	569	32
ZL105	622	570	52
ZL203	649	544	105

表 2.12-33　铸造铝合金的流动性

合金代号	流动性/mm	合金	流动性/mm
纯铝	317	ZL101	371
ZL102	420	ZL203	163
ZL104	359	ZL301	318
ZL105	344	ZL303	322

由表 2.12-32 可知，合金中共晶体及结晶温度间隔小的合金（如 ZL101、ZL102、ZL104、ZL105），有非常好的流动性。而结晶温度间隔大的合金（如 ZL203）流动性就差。

3.1.5　合金的收缩

收缩分体积收缩和线收缩。

1）体积收缩　当液体合金凝固时，体积发生明显的缩小，即收缩。这一收缩由三个阶段组成：①液相线以上温度的降低，液态合金的收缩；②由液相线到固相线时的凝固（结晶）收缩；③固态时冷却的收缩。其中影响最大的是凝固（结晶）收缩。因为在结晶过程中合金由于收缩而产生缩孔、缩松。根据合金结晶温度间隔不同，收缩可能集中也可能分散。结晶温度间隔小的会形成集中缩孔；结晶温度间隔大的会在铸件凝固时产生细小的孔洞，均匀分布。

2）线收缩　一般指铸件凝固完了到室温一段过程的固体收缩。线收缩见表 2.12-34。收缩的尺寸大小取决于合金成分和组织，见图 2.12-18。

表 2.12-34　铸造铝合金直线收缩表

合金代号	线收缩/%	合金代号	线收缩/%
ZL101	1.0	ZL203	1.4
ZL102	0.8	ZL301	1.3
ZL103	1.1	ZL401	1.0
ZL104	0.84	ZL303	0.97
ZL105	0.96		

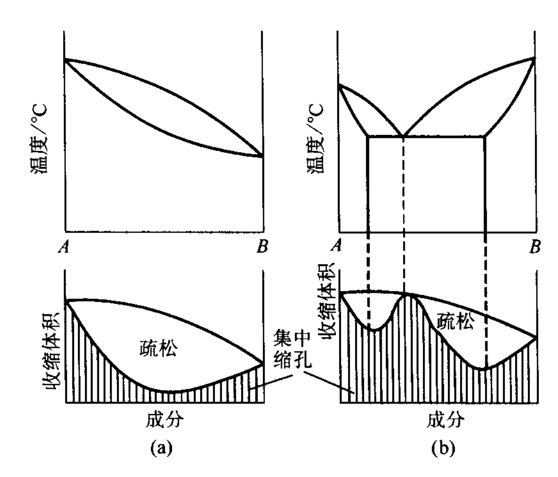


图 2.12-18　缩孔和疏松与合金成分的关系图

合金在结晶期间，铸件的凝固不是均匀进行的，特别是结晶温度间隔大的合金，高熔点相首先凝固搭成骨架，妨碍合金自由收缩，易疏松，产生应力会导致铸件发生热裂纹。

铸造铝合金的热裂性，主要取决于合金成分。共晶体和共晶体较多的合金，易形成集中缩孔，热裂倾向性小，结晶温度间隔大的固溶体类型的合金，热裂倾向就大。

3.2　铸造铝合金生产

铸造铝合金生产，首先要知道合金的成分和对杂质的要求。生产铸造铝合金，按铸造铝合金国家标准成分及要求做准备；若是生产铸造铝合金锭，按铸造铝合金锭国家标准成分和要求做准备。

3.2.1　金属炉料的准备

金属炉料根据所生产的合金需要来准备。

(1) 纯金属的准备

购买纯金属应根据国家纯金属标准和配料需要纯度来准

备。配制铸造铝合金用纯金属的国家标准及技术要求见表2.12-35。

表 2.12-35 纯金属标准及配制铸造铝合金技术要求

材料名称	技术标准	材料牌号或代号
铝锭	GB/T 1196—2002、GB/T 8644—2000	A199.50 以上
镁锭	GB/T 3499—1995	Mg99.80 以上
电解金属锰	YB/T 051—1993	DJMn99.5 以上
阴极铜	GB/T 467—1997	Cu-CATH-1、Cu-CATH-2
电解镍	GB/T 6516—1997	Ni99.90 以上
锌锭	GB/T 470—1997	Zn99.95 以上
镉	YS/T 72—1994	Cd99.96 以上
海绵钛	GB/T 2524—2002	HTi-4 以上
稀土金属	GB/T 4153—1993	RECe45 以上

(2) 中间合金

铝基中间合金锭技术要求见表2.12-36。配制高纯铸造铝合金时，应该采用高纯度铝基中间合金锭（见 HB 5371—1987）。

(3) 回炉料

回炉料分级，技术要求和最大回用量见表2.12-37。

(4) 铸造铝合金锭

铸造铝合金锭是合金锭生产厂家，根据国家标准生产的，供铸造厂使用（重熔），不必自己配制合金。铸造铝合金锭成分见表2.12-38和表2.12-39。

(5) 炉料计算（配料或配合金）

生产任务确定以后，就知道合金成分及对杂质含量的要求，因此用什么炉料也就可以定下来了。

根据经验或查有关数据，把合金元素烧损量确定下来，然后进行炉料计算。

表 2.12-36 铝中间合金锭化学成分（摘自 YS/T 282—2000）

序号	牌号	化学成分/% 合金元素 Cu	Si	Mn	Ti	Ni	Cr	B	Zr	Sb	Fe	Be	Al	杂质≤ Cu	Si	Mn	Ti	Ni	Cr	Zr	Fe	Zn	Mg	Pb	Sn	物理性能 熔化温度/℃	特性
1	AlCu50	48.0~52.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	余量	—	0.40	0.35	0.10	0.20	0.10	0.45	0.45	0.30	0.20	0.10	0.10	570~600	脆
2	AlSi24	—	22.0~26.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	余量	0.20	—	0.35	0.1	0.20	0.10	—	0.45	0.2	0.40	0.10	0.10	700~800	脆
3	AlSi20	—	18.0~21.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	余量	0.20	—	0.35	0.1	0.20	0.10	—	0.45	0.2	0.40	0.10	0.10	640~700	脆
4	AlSi12	—	11.5~13.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	余量	0.03	—	0.10	0.10	—	—	—	0.35	0.08	—	—	Ca 0.1	560~620	脆
5	AlMn10	—	—	9.0~11.0	—	—	—	—	—	—	—	—	余量	0.20	0.40	—	0.1	0.20	0.10	—	0.45	0.2	0.50	0.10	0.10	770~830	韧
6	AlTi4	—	—	—	3.0~5.0	—	—	—	—	—	—	—	余量	—	0.2	—	—	—	—	—	0.3	0.1	—	—	—	1 020~1 070	易偏折
7	AlTi5	—	—	—	4.5~6.0	—	—	—	—	—	—	—	余量	0.15	0.50	0.35	—	0.10	0.10	V 0.25	0.45	0.15	0.50	0.10	0.10	1 050~1 100	易偏折
8	AlNi10	—	—	—	—	9.0~11.0	—	—	—	—	—	—	余量	—	0.2	0.1	—	—	—	—	0.5	—	—	0.1	—	680~730	韧
9	AlCr2	—	—	—	—	—	2.0~3.0	—	—	—	—	—	余量	—	0.2	—	—	—	—	—	0.5	0.1	—	—	—	900~1 000	易偏折
10	AlB3	—	—	—	—	—	—	2.5~3.5	—	—	—	—	余量	0.1	0.2	—	—	—	—	—	0.4	0.1	—	—	—	800	韧
11	AlB1	—	—	—	—	—	—	0.5~1.5	—	—	—	—	余量	0.1	0.2	—	—	—	—	—	0.3	0.1	—	—	—	800	韧
12	AlZr4	—	—	—	—	—	—	—	3.0~5.0	—	—	—	余量	—	0.2	—	—	—	—	—	0.3	0.1	—	0.1	—	800~850	易偏折
13	AlSb4	—	—	—	—	—	—	—	—	3.0~5.0	—	—	余量	—	0.2	—	—	—	—	—	0.3	—	—	—	—	660	易偏折

续表 2.12-36

序号	牌号	化学成分 /%																								物理性能	
		合金元素												杂质≤												熔化温度/℃	特性
		Cu	Si	Mn	Ti	Ni	Cr	B	Zr	Sb	Fe	Be	Al	Cu	Si	Mn	Ti	Ni	Cr	Zr	Fe	Zn	Mg	Pb	Sn		
14	AlFe20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18.0~22.0	—	余量	0.1	0.2	0.3	—	—	—	—	—	0.1	—	—	—	1 020	脆
15	AlTi5B1	—	—	—	4.5~6.0	—	—	0.9~1.2	—	—	—	—	余量	0.02	0.20	0.02	—	0.04	0.02	0.02	0.30	0.03	0.02	—	—	800	易偏折
16	AlBe3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.0~4.0	余量	—	0.2	—	—	—	—	—	0.25	0.1	—	—	—	820	韧
17	AlSr5	—	Sr 4.0~6.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	余量	0.01	—	—	—	—	—	—	0.2	0.05	0.05	—	Ca 0.05	680~750	韧
18	AlSr10	—	9.0~11.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	余量	0.1	—	—	—	—	—	—	0.2	0.1	0.1	—	0.1	780~850	韧

表 2.12-37 回炉料的分级、技术要求和最大回用量

级别	分类	技术要求	每炉最大回用量/%
一级	1）不因杂质含量超标而报废的铸件 2）金属型铸件的浇冒系统 3）砂型铸件冒口	分析成分后使用	80
二级	1）砂型铸件浇道 2）坩埚底料 3）因为化学成分报废的铸件	重熔、精炼并分析成分	60
三级	溅屑和碎小的废料		30

注：1. 对铸件有特殊要求时（如针孔度等），回炉料用量酌情减少。
2. 当各级回炉料搭配使用时，回炉料总量不超过 80%，其中三级回炉料不多于 10%，二级回炉料不多于 40%。
3. 1类铸件不允许用二级和三级回炉料。

表 2.12-38 砂型、金属型和熔模铸造铝合金锭化学成分（摘自 GB/T 8733—2000） %

序号	合金锭牌号	合金锭代号	Al	Si	Cu	Mg	Mn	Ni	Ti	Zr	Zn	Sn	Pb	其他	Fe	杂质总和
1	ZAlSi7MgD	ZLD101	余量	6.5~7.5	0.2	0.30~0.50	0.35	—	0.2	Ti+Zr0.25	0.2	0.01	0.05	Be0.1	0.45	1.1
2	ZAlSi7MgDA	ZLD101A	余量	6.5~7.5	0.10	0.30~0.50	0.05	0.05	0.08~0.20	—	0.05	0.01	0.05	Ni0.05	0.12	0.6
3	ZAlSi12D	ZLD102	余量	10.0~13.0	0.30	0.10	0.5	—	0.2	—	0.1	—	—	—	0.6	1.6
4	ZAlSi9MgD	ZLD104	余量	8.0~10.5	0.1	0.2~0.4	0.2~0.5	—	—	Ti+Zr0.15	0.25	0.01	0.05	—	0.45	1.2
5	ZAlSi5Cu1MgD	ZLD105	余量	4.5~5.5	1.0~1.5	0.45~0.65	0.5	—	—	Ti+Zr0.15	0.2	0.01	0.05	Be0.1	0.45	1.3
6	ZAlSi5Cu1MgDA	ZLD105A	余量	4.5~5.5	1.0~1.5	0.50~0.65	0.1	—		—	0.1	0.01	0.05	—	0.15	0.4
7	ZAlSi8Cu1MgD	ZLD106	余量	7.5~8.5	1.0~1.5	0.35~0.55	0.3~0.5	—	0.10~0.25	—	0.2	0.01	0.05	—	0.5	1.1
8	ZAlSi7Cu4D	ZLD107	余量	6.5~7.5	3.5~4.5	0.1	0.3	—	—	—	0.2	0.01	0.05	—	0.4	0.9
9	ZAlSi12Cu2Mg1D	ZLD108	余量	11.0~13.0	1.0~2.0	0.5~1.0	0.3~0.9	0.3	0.20	—	0.2	0.01	0.05	—	0.4	0.8

续表 2.12-38

序号	合金锭牌号	合金锭代号	Al	Si	Cu	Mg	Mn	Ni	Ti	Zr	Zn	Sn	Pb	其他	Fe	杂质总和
10	ZAlSi12Cu1Mg1Ni1D	ZLD109	余量	11.0~13.0	0.5~1.5	0.9~1.4	0.2	—	0.20	—	0.2	0.01	0.05	—	0.4	0.8
11	ZAlSi5Cu6MgD	ZLD110	余量	4.0~6.0	5.0~8.0	0.3~0.55	0.5	0.3	—	—	0.5	0.01	0.05	—	0.5	1.5
12	ZAlSi9Cu2MgD	ZLD111	余量	8.0~10.0	1.3~1.8	0.45~0.65	0.10~0.35	—	0.10~0.35	—	0.1	0.01	0.05	—	0.35	1.0
13	ZAlSi7MgDA	ZLD114A	余量	6.5~7.5	0.1	0.50~0.65	0.1	—	0.10~0.20	—	0.1	—	—	—	0.15	0.6
14	ZAlSi5Zn1MgD	ZLD115	余量	4.8~6.2	0.1	0.45~0.7	0.1	—	—	—	1.2~1.8	0.01	0.05	—	0.25	1.0
15	ZAlSi8MgBeD	ZLD116	余量	6.5~8.5	0.3	0.4~0.6	0.1	—	0.10~0.30	0.2	0.3	0.01	0.05	Be0.15~0.40、B0.1	0.5	1.0
16	ZAlSi20Cu2RE1MgMnD	ZLD118	余量	19~22	1.0~2.0	0.5~0.8	0.3~0.5	—	0.2	0.1	0.1	0.01	0.05	RE0.6~1.5	0.5	—
17	ZAlCu5MnD	ZLD201	余量	0.3	4.5~5.3	0.05	0.6~1.0	0.1	0.15~0.35	0.2	0.2	—	—	—	0.20	1.0
18	ZAlCu5MnDA	ZLD201A	余量	0.05	4.8~5.3	0.05	0.6~1.0	0.05	0.15~0.35	0.15	0.1	—	—	—	0.10	0.4
19	ZAlCu4D	ZLD203	余量	1.2	4.0~5.0	0.03	0.1	—	0.20	0.1	0.2	0.01	0.05	—	0.6	2.2
20	ZAlCu5MnCdDA	ZLD204	余量	0.05	4.6~5.3	0.05	0.6~0.9	—	0.15~0.35	0.15	0.1	—	—	Cd0.15~0.25	0.13	0.4
21	ZAlCu5MnCdVDA	ZLD205A	余量	0.05	4.6~5.3	0.05	0.3~0.5	—	0.15~0.35	0.05~0.20	0.1	—	—	B0.01~0.06 V0.05~0.30 Cd0.15~0.25	0.10	0.3
22	ZAlCu3RE5Si2D	ZLD207	余量	1.6~2.0	3.0~3.4	0.2~0.3	0.9~1.2	0.2~0.3	—	0.15~0.25	0.2	—	—	RE4.4~5.0	0.5	0.8
23	ZAlMg10D	ZLD301	余量	0.3	0.1	9.8~11.0	0.15	0.05	0.15	0.2	0.15	0.01	0.05	—	0.25	1.0
24	ZAlMg5SiD	ZLD303	余量	0.8~1.3	0.1	4.6~5.6	0.1~0.4	—	0.2	—	0.2	—	—	—	0.45	0.7
25	ZAlMg8Zn1D	ZLD305	余量	0.2	0.1	7.6~9.0	0.1	—	0.1~0.2	—	1.0~1.5	—	—	Be0.03~0.1	0.25	0.9
26	ZAlZn11Si7D	ZLD401	余量	6.0~8.0	0.6	0.15~0.35	0.5	—	—	—	9.2~13.0	—	—	—	0.6	1.6
27	ZAlZn6MgD	ZLD402	余量	0.3	0.25	0.55~0.70	0.1	—	0.15~0.25	—	5.2~6.5	—	—	Cr0.4~0.6	0.4	1.25
28	ZAlMn1D	ZLD501	余量	0.20	—	—	1.50~1.70	—	0.15	—	—	—	—	RE0.03	0.3	—

注：1. 合金锭代号中“Z”、“L”、“D”分别为汉语拼音字“铸”、“铝”、“锭”的第一个字母，代号后附A的合金锭为高纯度合金锭。
2. 合金锭中有上下限数值的主要组元及Fe、Si、Mg为必检元素，其他元素可定期分析。化学成分中仅有一个数值的成分控制上限。
3. RE为混合稀土总量不少于98%，含铈量不少于45%的混合稀土金属。

表 2.12-39　压铸用铝合金锭化学成分（摘自 GB/T 8733—2000）　%

序号	合金锭牌号	合金锭代号	Mg	Si	Cu	Mn	Zn	Fe	Zr	Ti	Sn	Pb	Ni	其他	Al
1	YAlSi12D	YLD102	0.25	10.0~13.0	0.3	0.4	0.1	0.9	0.1	—	—	—	—	0.15	余量
2	YAlSi9MgD	YLD104	0.2~0.35	8.0~10.5	0.3	0.2~0.5	0.1	0.8	Zr+Ti0.15	0.15	0.01	0.05	—	0.15	余量
3	YAlSi8Cu3D	YLD112	0.3	7.5~9.5	2.5~4.0	0.6	1.0	0.9	—	0.2	0.2	0.3	0.5	0.15	余量
4	YAlSi11Cu3D	YLD113	0.3	9.6~12.0	2.0~3.5	0.5	0.8	0.9	—	—	0.2	—	0.5	0.15	余量

续表 2.12-39

序号	合金锭牌号	合金锭代号	Mg	Si	Cu	Mn	Zn	Fe	Zr	Ti	Sn	Pb	Ni	其他	Al
5	YAlSi7Cu5D	YLD117	0.50～0.65	16.0～18.0	4.0～5.0	0.5	1.5	0.9	—	—	0.3	—	0.3	0.15	余量
6	YAlMg5Si1D	YLD302	4.6～5.5	0.8～1.3	0.1	0.1～0.4	0.2	0.9	0.15	—	—	—	—	0.15	余量
7	YalMg3D	YLD306	2.6～4.0	1.0	0.1	0.4～0.6	0.4	0.6	—	—	0.1	—	0.1	0.15	余量

注：1. “Y” 为汉语拼音 “压” 的第一个字母。
2. 有上下限数值的主要组元及 Fe 为必检元素，其他元素可定期分析。
3. 化学成分仅有一个数值的为成分控制上限。

计算包括烧损在内炉料总数。假设炉料 100 kg（包括烧损），其中假设

各元素的需要量为 A_x

合金元素含量为 B_x

合金元素烧损量为 C_x

则
$$A_x=\frac{B_x}{1-C_x}$$

如果生产任务是 60 kg ZL104 合金。ZL104 合金中平均含 9% Si，0.27% Mg 和 0.4% Mn。杂质铁不大于 0.6%。其余为 Al。先不计杂质，Al 量为 90.33%。

又设各元素烧损量为：C_{Si} 为 1%，C_{Mg} 为 20%，C_{Mn} 为 0.8%，C_{Al} 为 1.5%。

1）100 kg 炉料中需要各种元素量为：

$$A_{Si}=\frac{B_{Si}}{1-C_{Si}}=\frac{9}{1-0.01}\approx 9.09\text{ kg}$$

$$A_{Mg}=\frac{B_{Mg}}{1-C_{Mg}}=\frac{0.27}{1-0.2}\approx 0.34\text{ kg}$$

$$A_{Mn}=\frac{B_{Mn}}{1-C_{Mn}}=\frac{0.4}{1-0.008}\approx 0.40\text{ kg}$$

$$A_{Al}=\frac{B_{Al}}{1-C_{Al}}=\frac{90.33}{1-0.015}\approx 91.70\text{ kg}$$

生产 100 kg 合金应投炉料

$$W_{100}=A_{Al}+A_{Si}+A_{Mg}+A_{Mn}=91.70+9.09+0.34+0.40=101.53\text{ kg。}$$

2）生产 60 kg 合金（W_{60}），各合金元素量为：

$$D_{Si}=\frac{W_{60}}{W_{100}}\times A_{Si}=0.6\times 9.09\approx 5.45\text{ kg}$$

$$D_{Mg}=\frac{W_{60}}{W_{100}}\times A_{Mg}=0.6\times 0.34\approx 0.20\text{ kg}$$

$$D_{Mn}=\frac{W_{60}}{W_{100}}\times A_{Mn}=0.6\times 0.40\approx 0.24\text{ kg}$$

$$D_{Al}=\frac{W_{60}}{W_{100}}\times A_{Al}=0.6\times 91.7\approx 55.02\text{ kg}$$

生产 60 kg 合金实际投料应为

$$W_{60}=D_{Al}+D_{Si}+D_{Mg}+D_{Mn}=55.02+0.24+0.20+5.45=60.91\text{ kg}$$

3）回炉料（E）用约 30%，即 18 kg。回炉料中含 9% Si，0.27% Mg，0.4% Mn，0,4% Fe，含 Al 量为 90.33%。各元素含有量为：

$$E_{Si}=18\times 0.09=1.62\text{ kg}$$

$$E_{Mg}=18\times 0.002\,7=0.05\text{ kg}$$

$$E_{Mn}=18\times 0.004=0.07\text{ kg}$$

$$E_{Al}=18\times 0.903\,3=16.26\text{ kg}$$

4）应补加元素（F）量为：

$$F_{Si}=D_{Si}-E_{Si}=5.45-1.62=3.83\text{ kg}$$

$$F_{Mg}=D_{Mg}-E_{Mg}=0.20-0.05=0.15\text{ kg}$$

$$F_{Mn}=D_{Mn}-E_{Mn}=0.24-0.07=0.17\text{ kg}$$

设用 Al - 12% Si（杂质 Fe 0.4%）和 Al - 10% Mn（杂质 0.4%Fe）中间合金。

应补加 F_{Si}（3.83 kg）所需 Al - 12% Si 中间合金量为：

$$G_{Al-Si}=\frac{F_{Si}}{0.12}=\frac{3.83}{0.12}\approx 31.92\text{ kg}$$

应补加 F_{Mn}（0.17 kg）所需 Al - 10% Mn 中间合金量为

$$G_{Al-Mn}=\frac{F_{Mn}}{0.1}=\frac{0.17}{0.1}=1.7\text{ kg}$$

中间合金带入的铝量为：

$$Al_{Al-Si}=G_{Si}-F_{Si}=31.92-3.83=28.09\text{ kg}$$

$$Al_{Al-Mn}=G_{Mn}-F_{Mn}=1.7-0.17=1.53\text{ kg}$$

5）应补加纯铝（Al）量为：

$$Al_{补}=D_{Al}-(E_{Al}+Al_{Al-Si}+Al_{Al-Mn})=55.2-(16.26+28.09+1.53)=9.32\text{ kg}$$

6）实际炉料总质量为

$$W_{60}=Al_{补}+G_{Al-Si}+G_{Al-Mn}+Mg+E=9.32+31.92+1.7+0.2+18=61.14\text{ kg}$$

7）炉料中的铁质量（H_{Fe}）为（纯铝中含 0.3% Fe）：

$$H_{Fe}=Al_{补}\times 0.3\%+Al_{Al-Si}\times 0.4\%+Al_{Al-Mn}\times 0.4\%+E\times 0.4\%$$
$$=9.32\times 0.3\%+31.92\times 0.4\%+1.7\times 0.4\%+18\times 0.4\%\approx 0.235\text{ kg}$$

炉料中 Fe 的含量 $W_{(Fe)}$ 为

$$W_{(Fe)}=\frac{0.235}{60}\times 100\%=0.39\%$$

当然，正常生产也不一定一笔一笔地算。新料容易计算，回炉料是合格的不用算，最后把杂质计算一下是否超过标准就行了。这要靠经验。

在配料时，这些炉料必须清洁、干燥、无其他金属或非金属附加物。

3.2.2 辅助材料

（1）熔炼用工艺辅助材料

常用工艺辅助材料的标准及技术要求见表 2.12-40。

表 2.12-40　铝合金熔炼用工艺辅助材料技术要求

材料名称	技术标准	技术要求
氧化锌	GB/T 3494—1996	ZnO - X2 以上
滑石粉	GB/T 15342—1994	一等品以上
碳酸钠	GB/T 210—1992	一等品以上
水玻璃	GB/T 4209—1996	一等品以上
氟锆酸钾	—	98%以上
二氧化钛	ZBG 13004—1990	一等品
六氯乙烷	ZBG 16007—1989	优级品
氯化锌	HG/T 2323—1992	优等品
氯化钠	GB/T 5462—1992	优级品
氯化钾	GB/T 7118—1999	一级品以上

续表 2.12-40

材料名称	技术标准	技术要求
氟化钠	GB/T 4293—1984	二级品以上
氟硅酸钠	HG/T 3252—2000	优等品
冰晶石	GB/T 4291—1999	一级品以上
碳酸钙	ZBG 12009—1988	一等品以上
氯化镁	GB/T 8453—1987	一级品以上
光卤石	—	氧化镁≤2%，不溶物≤1.5%，水分≤2%，氯化镁 44%～52%，氯化钾 36%～46%

(2) 熔剂

熔剂分覆盖剂、精炼剂和造渣剂。

1) 覆盖剂　覆盖剂的作用是保护金属在熔炼过程中不氧化或少氧化以及不吸收气体或少吸收气体。其基本组元是氯化钾和氯化钠，选共晶成分，有的添加部分冰晶石。一般来讲应该经过熔化冷却后粉碎备用，熔点 650℃左右。目前，市场供应的成品基本上都是混合物，显然是不合适的。正规常用覆盖剂的配方及技术条件见表 2.12-41。

应当指出，为了获得高的成品率和提高或保持熔体的纯净程度，从装炉到浇铸为止，应在保护熔剂覆盖下进行，也就是应该使用覆盖剂。覆盖剂的熔点要低于合金的熔点，其密度要小于合金的密度。

2) 精炼剂　精炼剂是熔体净化用的，一方面清除非金属夹杂，另一方面把气体排出来。常用精炼剂见表 2.12-42。

表 2.12-41　铝合金和铝中间合金熔炼常用覆盖剂及其他熔剂

组分及其含量/%	配制方法及要求	适用范围
Na_3AlF_6(100)	烘烤脱水	铝钛中间合金熔炼覆盖剂
KCl(40) + BaCl(60)	混合均匀后熔化，浇注成 10 mm 厚度的锭子，然后破碎成粉状，保存在 110～150℃待用	铝铍中间合金、铝铬中间合金熔炼覆盖剂，高熔炼温度用覆盖剂
NaCl(50) + KCl(50)	各组分在 200～300℃烘烤 3～5 h，混合后在 150℃保存待用（应是目前普遍使用的配方和制备方法，多数用户不在 150℃下保存，因此含水量较大）	一般合金熔炼覆盖剂
NaCl(39) + KCl(50) + CaF_2(4.4) + Na_3AlF_6(6.6)		重熔废料用熔剂
CaF_2(15) + $NaCO_3$(85)		重熔废料（覆盖用）熔剂
NaCl(60) + CaF_2(20) + NaF(20)		重熔废料（搅拌用）熔剂
NaCl(63) + KCl(12) + Na_2SiF_6(25)		熔制活塞铝合金覆盖剂
$MgCl_2$(14) + KCl(31) + $CaCl_2$(44) + CaF_2(11)		铝镁合金用熔剂
$MgCl_2$(67) + NaCl(18) + CaF_2(10) + MgF_2(15)		
$MgCl_2\cdot KCl$(光卤石)(100)	缓慢升至 100℃保温，脱水后升温到 660～680℃，熔化浇注，破碎后置于密封容器中待用	铝镁合金用熔剂
$MgCl_2\cdot KCl$(80) + CaF_2(20)		
NaF(65) + NaCl(35)		真空精炼覆盖剂
NaF(40) + NaCl(45) + Na_3AlF_6(15)		

表 2.12-42　铝合金常用的精炼剂

名称	特　点	适　用　范　围
氯气	对铸件针孔度要求高时采用，但设备复杂，污染环境，对厂房和设备腐蚀严重，对人体有害	针孔度要求严格的铸件用
六氯乙烷（C_2Cl_6）	不吸潮、无需重熔、腐蚀性小、易于保存，可以广泛代替氯盐精炼剂	各种铸造铝合金通用
四氯化碳（CCl_4）	精炼效果好，同时对合金有晶粒细化作用	Al-Si 合金用
二氯化锰（$MnCl_2$）	使用前在 100～120℃烘烤 2～4 h，并保存在 100～130℃的干燥箱中	适用于 Al-Cu 合金用
二氯化锌（$ZnCl_2$）	使用前重熔脱水并保存在 100～130℃的干燥箱中	适用于含 Zn 合金或对 Zn 杂质要求不严的合金
钡熔剂或光卤石	先进行除水重熔处理；对坩埚工具等设备有腐蚀；熔炼除渣不彻底，易造成熔剂夹渣	主要用于 ZL301 等 Al-Mg 合金熔炼的除渣精炼
惰性气体	氮气或氩气，成本低，无污染	适用于各种合金，尤其 Sr 变质合金
成品精炼剂	为盐类熔剂配制，可以直接使用，有变质和晶粒细化作用	根据说明书使用

目前，成品精炼剂用得比较普遍。

成品精炼剂有标准。精炼剂的性质应能溶解与吸收氧化物，特别是氧化铝，促进气体排除及金属与氧化皮分离。因此，要求精炼剂有最小的吸湿性，没有含氢的物资，精炼剂

不应与合金元素发生化学作用。精炼剂的熔化温度不应高于合金的浇铸温度，而且密度要小于合金的密度。因此，精炼剂的基本组成是氯化钾和氯化钠。另外再加氟化物（如 Na_3AlF_6 或 Na_2SiF_6 或 NaF 或 CaF_2），调节精炼剂表面张力。

熔融的精炼剂在氧化物（固相）界面及液体合金界面上的表面张力大小，决定了精炼剂的吸附性能。精炼剂与液体合金的表面张力愈大，愈容易与液体合金分离。在界面上精炼剂与氧化铝的表面张力最小时，精炼剂能最大限度地润湿氧化铝并把它从液体合金中排出。提高液体合金与氧化铝界面上的表面张力，将有利于精炼剂的排除氧化铝的作用。

精炼剂的表面张力靠加入表面活性物质来调节，表面活性物质愈多，表面张力愈小，精炼剂的吸附能力愈好。

精炼剂不仅能除掉铝合金中的氧化物，而且也能除气。一方面精炼剂吸附、溶解氧化物，使液体合金表面氧化膜受到破坏，气体易于排出；精炼剂从液体合金吸附氧化物上浮，同时也把气体带出。另外，加入的表面活性物质分解（如 $Na_3AlF_6 \rightarrow 3NaF + AlF_3$），有气泡产生，气泡吸附液体合金中气体（主要是氢气），也有除气作用。

3）造渣剂　顾名思义，是把液体合金表面上的熔渣如何顺利地清除掉（扒渣），这要看熔渣的性质。想干净、顺利、不带出金属一般都使用造渣剂来调节熔渣的性质，使其表面张力增大，使渣变成干粉状，合金与渣易分离。

市场有成品造渣剂（又名打渣剂）供应。

应注意，含镁量高的铸造铝合金，应使用光卤石系统的熔剂。

（3）变质剂

1）钠盐变质剂　这类变质剂可自己购买原料配制，也有成品供应，其化学成分见表2.12-43。

表2.12-43　铝合金常用钠盐变质剂

名称	成分/%				熔点/℃	适应范围
	氟化钠	氯化钠	氯化钾	冰晶石		
二元变质剂	67	33	—	—	730	适用于ZL102合金
三元变质剂	25	62	13	—	700	适用于ZL101、ZL105、ZL104合金
一号通用变质剂	60	25	—	15	850	浇注温度为740~760℃的共晶铝硅合金
二号通用变质剂	40	45	—	15	750	浇注温度为740~760℃的共晶及亚共晶铝硅合金
三号通用变质剂	30	50	10	10	710	浇注温度为700~740℃的共晶及亚共晶铝硅合金

2）铝-锶合金　锶的变质作用与钠的相似，但作用时间长。不像钠，仅有30 min有效期。而锶变质剂是长效的，保管和使用方便。铝-锶合金中锶含量一般为10%。

3）磷变质剂　有成品卖，自己配制不方便，因磷易燃。这是与钠作用相反的变质剂，多用在像活塞铸造铝硅合金中，可提高其耐磨性和减小线胀系数。注意废料分开保管，不能与钠变质的混杂。

4）铝-锑合金　用锑作变质剂，其对铸造组织变质作用不十分明显，但热处理（淬火时效）后，能提高合金的强韧性和耐磨性。废料应分开保管，不要与其他废料混在一起。一般铝-锑合金中锑含量为4%~10%。

5）稀土金属　稀土金属分单一稀土金属和混合稀土金属，而混合稀土金属又分与富铈的和富镧的。铸造铝合金中应用稀土金属，最好购买富镧的混合稀土。稀土金属可作合金元素，也可作变质剂，主要消除易溶有害相。

（4）涂料

铸造厂经常使用铁坩埚熔炼铝合金，坩埚内必须经常保持在涂料保护状态下使用。另外，工具和锭模（零件模）也需涂料保护。

涂料配方见表2.12-44。

表2.12-44　坩埚、工具和锭模涂料

代号	组分	配方/%	适用范围
T—1	耐火水泥 硅砂 苏打 水（温度大于40℃）	27.8 16.7 27.8 27.7	坩埚
T—2	白垩粉 水玻璃（密度1.45~1.55 g/cm³） 水	22.2 2.8 75	浇注工具

续表2.12-44

代号	组分	配方/%	适用范围
T—3	滑石粉 水玻璃 水	20~30 6 余量	坩埚、锭模及浇注工具
T—4	氧化锌 水玻璃 水	10~20 3~5 余量	坩埚、锭模及浇注工具
T—5	耐火黏土 滑石粉 水玻璃 水	5~10 5~10 3~6 余量	坩埚、浇注工具
T—6	石墨粉 硅砂 耐火黏土 水玻璃	50 30 20 适量	铸铁坩埚涂料

3.3　熔炼与浇注

3.3.1　熔炼

1）熔炼炉选择　熔炼铝合金目前有电炉（电阻炉、感应电炉）和燃料（固体、液体和气体）炉。炉型分坩埚炉、反射炉、中频感应炉。

选择熔炼炉时应考虑：有利快速升温、快速熔化，熔炼时间短，合金元素烧损和吸气少，不增加合金杂质或夹杂；热效率高，能耗少，熔炼炉寿命长；便于操作，易控温、环境污染少，劳动条件好。

2）装炉　装炉前，如果是新炉，应该按规定烘炉；如果是新坩埚应该焙烧；正常生产时冷炉应该预热。

炉料应该预热，工具应该烘烤。

装炉：回炉料、合金锭、纯铝、中间合金先放入炉内。容易烧损易挥发元素待大部分炉料熔化后再加入。

3）熔炼与精炼　熔化时间要短，熔炼时应加覆盖剂，减少氧化烧损和吸气。熔炼与精炼工艺参数见表2.12-45。

表2.12-45　铸造铝合金熔炼与精炼工艺

合金系	熔炼温度/℃	精炼温度/℃	精炼时间/min	静置时间/min
Al-Si	700~740	710~730	5~10	10~20
Al-Cn	740~750	710~730	5~10	10~20
Al-Mg	690~700	660~680	5~10	10~20

4）变质处理　用Al-Sr合金、Al-Sb合金、Al-RE合金进行变质处理容易方便、精炼后加入即可。锑的加入量为0.2%~0.3%；锶的加入量为0.02%~0.10%；稀土加入量为0.1%~0.3%（有人建议可加入到1.5%，这就不是变质处理了，而变成含稀土的合金啦）。

钠盐变质处理稍复杂些。钠盐要预热，到300℃。Al-Si合金（Si>5%）熔化过热到725~740℃，将烘烤过的变质剂撒在合金液体表面上，用量为合金的2%~3%，保持10余分钟，变质剂结壳（如未结壳，再撒上一些氟化钠），打碎硬壳，将其压入合金液体100~150 mm深处，轻轻地搅拌3~5 min。钠变质处理的有效期为30 min。

3.3.2　浇注

浇注之前应做好炉前检验，如温度、含气量、化学成分及断口均合格。还要检查锭模或铸型是否正常。一切均达到要求后，扒渣，或用浇勺或用浇包浇注。

浇注时坩埚或炉底应保留部分合金液，便于继续熔炼及免得把坩埚或炉底部杂质浇到铸锭或铸型中。

浇注温度：ZL101、ZL102、ZL104及ZL105为680~760℃；ZL201、ZL203、ZL205A为700~750℃；ZL301、ZL303为680~740℃；ZL401为700~780℃。

3.3.3　铸造方法

铝是少数几种可以用所有方法铸造的金属之一。使用最多的是压力铸造、金属型铸造和砂型铸造（湿砂和干砂），其次是石膏型铸造和熔模铸造以及离心铸造，也可以连续铸造。近些年半凝固铸造和喷射沉积发展很快。

铸造方法的选择是既简单又复杂的事。说简单，企业有什么设备，根据现实条件和成本及铸件要求来确定；说复杂，有很多因素影响生产专用铝合金零件铸造方法的选择。

3.3.4　铸造缺陷

铸件合格率是经济上非常重要的指标，应千方百计认识铸造缺陷、避免缺陷，生产出无缺陷的铸件。产生废品可能由很多因素造成的，对其种类、产生原因以及防止方法的了解实为必要。

常见的铸造缺陷、特征、形成原因及防止方法，见表2.12-46。

表2.12-46　常见的铸造缺陷

名称	特　征	形成原因	防止方法及修补
气孔	1）气孔主要呈梨形，圆形或椭圆形 2）孔壁表面光滑，带有金属光泽 3）大多存在于铸件皮下，大气孔单独存在，小气孔成群出现 4）油烟气孔呈油黄色	1）液体金属浇注时被卷入的气体在合金液凝固后以气孔的形式存在于铸件中 2）金属与铸型反应后在表皮下生成皮下气孔 3）合金液中的夹渣或氧化皮上附着的气体被混入合金液后形成气孔	1）浇注时防止空气卷入 2）合金液在进入型腔前先经过滤网以去除合金中的夹渣、氧化皮和气泡 3）更换铸型材料或加涂料层防止合金液与铸型发生反应 4）允许焊补部位将缺陷清理干净后进行焊补
针孔	1）均匀的分布在铸件整个断面上的析出性小孔（直径小于1 mm） 2）凝固快的部位孔小数量少，凝固慢的部位孔大数量多 3）在共晶合金中呈圆形孔洞，在凝固间隔宽的合金中呈长形孔洞 4）在X射线底片上呈小黑点，在断口上呈互不连接的乳白色小凹点	合金在液体状态下溶解的气体（主要为氢），在凝固过程中自合金中析出而形成的均布形式的孔洞	1）合金在液体状态下彻底精炼除气 2）在凝固过程中加大凝固速度，防止溶解的气体自合金中析出 3）铸件在压力下凝固，防止合金溶解的气体析出 4）炉料、辅助材料及工具应干燥
缩孔和缩松	1）铸件凝固过程由于补缩不良形成的孔洞 2）缩孔相对集中，形状极不规则，孔壁粗糙并带有枝晶状，常出现在铸件最后凝固部位 3）缩松细小而分散地出现在铸件的断面上 4）铸件缩孔和缩松引起气密性试验的渗漏	1）铸件冒口位置和尺寸与热节不配套，不能有效补缩引起缩孔 2）同时凝固的铸件厚大部位不能有效获得补缩引起缩松	合理设计铸件浇冒口系统和浇注位置，尽量保证铸件顺序凝固和冒口充分补缩，可以减轻缩孔和缩松产生
疏松（显微缩松）	1）呈海绵状的不紧密组织，严重时呈缩孔 2）孔的表面呈粗糙的凹坑，晶粒粗大 3）断口呈灰色或浅黄色，热处理后为灰白、浅黄或灰黑色 4）多在热节等铸件缓慢凝固部位产生，分布在枝晶间或枝晶内 5）在X射线底片上呈云雾状，荧光检查时呈密集的小亮点	1）合金液除气不干净形成气体性疏松 2）最后凝固部位补缩不足 3）铸型局部过热、水分过多、排气不良	1）保持合理的凝固顺序和补缩 2）保持炉料洁净 3）在疏松部位放置冷铁 4）在允许焊补的部位可将缺陷部位清理干净后焊补

续表 2.12-46

名称	特征	形成原因	防止方法及修补
夹杂	由涂料、造型材料、耐火材料等混入合金液中而形成的铸件表面或内部的与基体金属成分不同的质点	1）外来物混入液体合金并浇注入铸型 2）精炼效果不良 3）铸型内腔表面的外来物或造型材料剥落	1）仔细精炼并注意扒渣 2）熔炼工具涂层附着牢固 3）浇注系统及型腔应清理干净 4）炉料应保持清洁 5）表面夹杂可打磨去除，必要时可进行焊补
冷隔	1）铸件上穿透或不穿透性的，边缘呈圆角状的裂缝 2）多出现在远离浇口的宽大薄壁部位，金属汇合部位以及冷铁和芯撑等激冷部位	1）金属液浇注温度太低 2）金属液充型流程太长 3）壁太薄 4）冷铁或芯撑冷却能力过大	1）适当提高浇注温度 2）调整浇冒系统位置，减少金属液流程 3）适当加大薄壁铸件的壁厚 4）减少冷铁或芯撑尺寸
夹渣	1）氧化夹渣以团絮状存在于铸件内部，断口呈黄色或灰白色，无光泽 2）熔剂夹渣呈暗褐色点状，夹渣清除后呈光滑表面的孔洞，在空气中暴露一段时间后，有时出现腐蚀特征 3）一般存在于铸件上部或浇注死角部位	1）精炼、变质处理后除渣不干净 2）精炼、变质处理后静置时间不够 3）浇注系统不合理，二次氧化皮卷入合金液中 4）精炼后合金液搅动或被污染	1）严格按精炼、变质处理和浇注工艺操作 2）浇注时应使金属液流平稳地注入铸型，采用过滤技术 3）炉料应保持洁净，回炉料处理及使用量应严格遵守工艺规程
裂纹	1）铸件凝固后在较低温度下产生的裂纹称冷裂。冷裂纹一般有金属光泽，常穿过晶粒延伸到整个断面 2）铸件在凝固后期或凝固后在较高的温度下形成的裂纹称热裂，热裂纹断面呈氧化特征，无金属光泽，多产生在热节区尖角内侧，厚薄断面交汇处，常和疏松共生。热裂纹沿晶粒边界产生和发展，外形曲折无规则 3）由于铸件补缩不当，收缩受阻或收缩不均匀而产生的裂纹称缩裂，一般出现在铸件刚凝固后	1）铸件各部分冷却不均匀 2）铸件凝固和冷却过程受到外界阻力而不能自由收缩，内应力超过合金强度而产生裂纹	1）尽可能保持顺序凝固或同时凝固，减少内应力 2）细化合金组织 3）选择适宜的浇注温度 4）增加铸型和型芯的退让性
偏析	1）用肉眼或低倍放大镜可见的化学成分不均匀性称宏观偏析 2）用显微镜或其他仪器方能确定的显微尺度范围内的化学成分不均匀性称微观偏析，分为枝晶偏析和晶间偏析	1）宏观偏析一般是由于熔炼过程中元素的化合物因密度与基体不同沉淀或上浮 2）合金凝固过程中由于溶质再分配引起某些元素或低熔点物质在晶界或枝晶间富集导致微观偏析	1）宏观偏析可以通过适当缩短金属液的停留时间，浇注时充分搅拌合金液，在合金液中加入阻碍初晶浮沉的元素，降低浇注温度或加快凝固速度等方法减弱 2）晶粒细化、提高冷却速度和均匀化热处理可以减轻微观偏析
外渗豆（反偏析）	1）铸件表面上形成豆粒状的凸起物 2）金相检查一般为低熔点共晶富集区	当铸件中心部位尚未凝固时，铸件表面收缩，中心未凝固的液相穿透表面层渗出而生成	1）适当降低浇注温度 2）适当提高铸型的冷却能力 3）延长开型时间
金相组织不合格	1）晶粒粗大 2）变质不足或变质过度 3）其他有金相组织要求的项目不合格	1）晶粒细化不充分 2）变质处理孕育期短或停留时间太长，变质剂使用量不合适	1）采用科学合理的晶粒细化和变质处理工艺 2）炉前检测并及时调整合金熔铸工艺
化学成分不合格	主要元素含量超过上限或低于下限，杂质元素超过允许的上限含量	1）中间合金或预制合金成分不均匀或成分分析误差过大 2）炉料计算或炉料称量错误 3）熔炼操作失当，易氧化元素烧损过大 4）熔炼搅拌不匀，易偏析元素分布不均	1）炉前分析成分不合格时，适当调整成分 2）最终检验不合格时，可会同设计及使用部门协商处理
物理、力学性能不合格	铸件强度、硬度、伸长率以及耐热、耐蚀、耐磨和电性能等一项或多项不合格	合金成分不合格，金相组织不合格或热处理不适当等因素	根据需要调整合金成分和热处理工艺等

4 铸件热处理

铝合金铸件热处理的目的是为了改善组织，提高强度、硬度、塑性、抗蚀性和尺寸稳定性；消除应力、改善切削加工及高温工作稳定性能等。

所采取的工艺有退火、固溶处理（淬火）、时效及循环热处理等。

4.1 铸造铝合金热处理状态及代号

铸造铝合金热处理状态及代号见表2.12-47。

表2.12-47 铸造铝合金热处理状态及代号

热处理状态（GJB 1695—1993）				相近的国外状态代号①		
类 别	代号	用 途	备 注	国际通用规范②	ISO	
人工时效	T1	对湿砂型、金属型，特别是压铸件，由于冷却速度较快有部分固溶效果，人工时效可以提高强度、硬度、改善切削加工性能	1）在湿砂型、金属型或压力铸造时，能获得过饱和固溶体的铸件，采用人工时效可以强化铸件，改善铸件性能 2）通过T1处理后的铸件可以得到表面粗糙度值小的加工表面 3）T1处理可以提高ZL104、ZL105等合金的强度	T5	TE	T5
退火	T2	消除铸件在铸造和加工过程中产生的应力，提高尺寸稳定性以及合金的塑性	根据合金的种类及铸件的使用要求，选择适合的退火工艺规范	O	O	O
固溶处理（淬火）加自然时效	T4	通过加热、保温及快速冷却实现固溶强化以提高合金的力学性能，特别是提高塑性及常温抗腐蚀性能	因为固溶处理后到使用要经过较长时间，所以实际上是固溶处理加自然时效	T4	TB	T4
固溶处理（淬火）加不完全人工时效	T5	固溶处理后进行不完全人工时效，时效是在较低的温度和较短的时间下进行，进一步提高合金的强度和硬度	合金保持有高的塑性，但耐腐蚀性能下降，特别是晶间腐蚀倾向增强	T6	TF	T6
固溶处理（淬火）加完全人工时效	T6	可获得最高的抗拉强度，但塑性有所下降。时效在较高的温度和较长的时间下进行	合金强度和硬度提高，耐腐蚀性能降低			
固溶处理（淬火）加稳定化处理	T7	提高铸件组织和尺寸稳定性及合金的抗腐蚀性。主要用于较高温度下工作的零件，稳定化处理温度可以接近于铸件的工作温度	人工时效是在高于T6的温度下进行，提高合金抗应力腐蚀性能，合金还保持较高的力学性能	T7	TM	T7
固溶处理（淬火）加软化处理	T8	固溶处理后采用高于稳定化处理的温度，获得高塑性和尺寸稳定性好的铸件	软化处理温度高于稳定化处理温度，铸件尺寸稳定，合金塑性提高，但强度降低	—	—	—
冷热循环处理	T9	充分消除铸件内应力及稳定尺寸，用于高精度铸件	冷却和加热的温度及循环次数取决于零件工作的条件和合金的性质，经切削加工后的零件承受冷热循环处理（冷却到 -70℃ 有时到 -196℃，然后再加热到350℃或其他温度）数次便可	—	—	—
铸造状态	F	—	—	F	F	F

① 国内外对应的热处理状态为相近，不一定完全相同。
② ISO（ISO 2107—1983）、欧盟（EV 1706—1998）、美国（ANSI H35.1—1997）、日本（JIS H0001—1998）等的热处理状态基本相同，表中作为国际通用规范列出。

4.2 热处理原理

4.2.1 铸造铝合金的组织特征

铸态合金的组织通常偏离平衡，以二元共晶合金系为例。

图2.12-19为二元共晶系状态图，上有非平衡固相线（虚线）。

x_1 合金在平衡结晶时，α固溶体的成分沿 bs 线变化，并在 s 点结晶完毕，全部组织为均匀的α固溶体。

若在非平衡条件（铸造）下结晶，首先结晶的固溶体与随后析出的固溶体成分不相同。因为来不及扩散，成分不均匀，固溶体平均成分沿 bc 线变化，先结晶的固溶体部分（在中心）中含 B 组元少，后结晶的固溶体部分（周围）含 B 组元多。当温度降到共晶温度（c 点）后，余下的液相则以（α+β）共晶的方式最后结晶。也就是说，在非平衡结晶（铸造）条件下，x_1 合金的组织由枝晶状的内部成分不均匀α固溶体及非平衡共晶体组成。通常，非平衡共晶体中的α相依附在先结晶的α固溶体上，β相则以网状分布在枝晶网

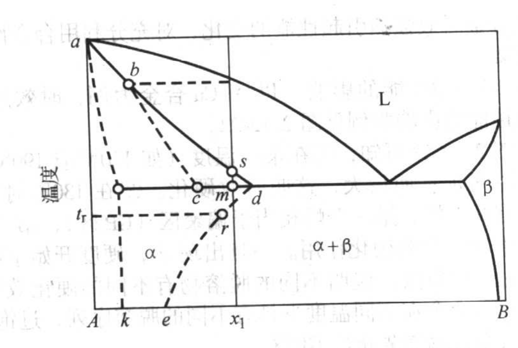


图 2.12-19 共晶系状态图及非平衡图相线

胞的周围，在显微镜下观察不到典型的共晶组织形态。

除此之外，从图 2.12-19 的 de 线可知，x_1 合金固溶体结晶部分，B 组元浓度可能超过 e 点，若在结晶完毕后仍以较快速度继续冷却，合金元素 B 来不及从固溶体中析出，则这部分固溶体处在过饱和状态。由于冷却速度过快，共晶结晶温度可能下移。

ZL203 合金是简单 Al-Cu 合金，含铜量 4% ~ 5%，其铸造组织见图 2.12-20，就是一例。

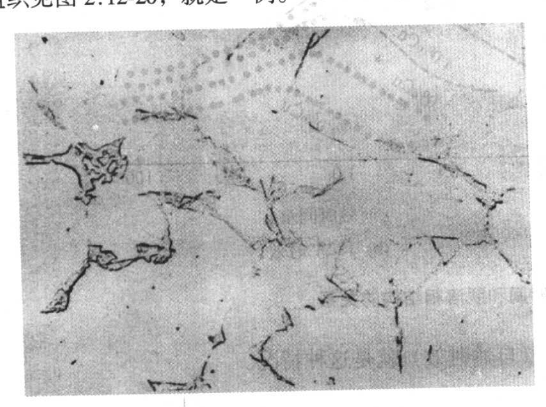


图 2.12-20 ZL203 合金金属型铸造未热处理组织

综上所述，在通常工业生产的冷却条件下，合金铸造状态不平衡组织特征如下。

1）基体固溶体成分不均匀，晶内偏析，组织呈树枝状。

2）可溶相在基体中的最大溶解度发生偏移，平衡状态应为单相成分的合金可能出现非平衡的第二相，而多相合金过剩相的数量会增加。

3）高温形成的不均匀固溶体，其浓度高的部分在冷却时来不及充分地扩散，因而可能处于过饱和状态。

以上非平衡结晶状态的组织特征，无疑会给铸造状态合金的性能带来很大的影响。

1）若枝晶偏析使组织中出现非平衡脆性相，则合金塑性下降，特别是在枝晶网胞边缘上生成连续的粗大脆性化合物网时，合金塑性急剧下降。

2）枝晶网胞中部与边部化学成分不同，形成浓度差微电池，降低合金的电化学抗蚀性。固溶体中出现非平衡过剩相，一般也会降低抗蚀性。

3）固相线下移，在热处理时，未加考虑，会使局部区域发生过早的熔化，即过烧现象。

4）铸造状态合金组织是亚稳定的，铸件在高温下工作时，会发生固溶体成分均匀化和非平衡相的溶解，促进蠕变过程性能发生不断变化，有时过早地超过容许范围而使铸件失效。

4.2.2 铸造铝合金组织加热和冷却时的变化

以图 2.12-21 为例，C_0 成分合金，室温平衡组织为 α+β。α 固溶体为基体，β 为第二相。合金加热至 T_q 时，β 相溶解于 α 固溶体中，合金组织此时呈单相 α 固溶体，这就是合金的固溶化。如果 C_0 合金此时自 T_q 温度以足够大的冷却速度冷却下来，合金元素 B 来不及形核和长大成 β 相，β 相不可能析出，所获得的室温组织是成分为 C_0 的单相过饱和 α 固溶体，这就是淬火，又称固溶处理。

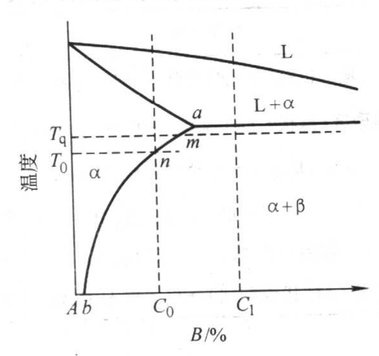


图 2.12-21 有溶解度变化的二元系状态图

C_1 成分合金，平衡冷却结晶组织为 α 固溶体 +（α+β）共晶体。(α+β) 共晶体存在于 α 固溶体晶粒周边。当加热到 T_q 温度后，合金组织为图 2.12-21 中 m 点的 α 固溶体 +(α+β) 共晶体。此时共晶体中的 α 固溶体也为 m 点成分。如果此时从 T_q 温度淬火，其组织仍为 α+（α+β)，但 α 为过饱和固溶体，其成分为高温 m 点成分。此时抗拉强度和塑性提高，这不是主要目的，主要目的是为随后的时效作组织准备。

若为非平衡冷却，铸造组织在加热过程中，其主要变化是枝晶偏析的消除和非平衡相的溶解，使合金溶质元素浓度（成分）逐渐均匀。这个过程比较复杂，在任何一个温度（如图 2.12-21），α 固溶体本身发生均匀化过程，同时会有 β 相溶解，达到平衡为止。此时，虽然 C_1 合金在高温下的组织应该为单相 α 固溶体，但由于温度还没达到应有的水平，合金仍有一部分 β 相残留着。另外，在此温度下，原来铸造组织中过剩相有很高浓度，还会发生固溶体分解。因此，铸造合金组织在加热中发生相溶解、固溶体分解、成分均匀化过程，要想达到平衡状态，需要有足够的时间。成分均匀是限于晶粒内部枝晶偏析，区域偏析合金元素需要晶间互相扩散，而晶界处又多有杂质、空隙、氧化膜等存在，这种扩散难以实现。

合金在高温加热，过剩相多而不能完全溶解时，会发生聚集和球化，以减小界面积（能），达到热力学更稳定的状态。

上述加热保温以后，合金获得平衡组织，快速冷却叫淬火，如果缓慢地冷却下来，过饱和固溶体会分解，同时伴随着二次相的析出。冷却速度不同，析出相的尺寸及分布情况也有所区别。铸造铝合金在固溶化后缓慢冷却叫退火，合金塑性提高、抗拉强度和硬度下降。

4.2.3 时效

过饱和固溶体有自发分解的倾向，叫脱溶。时效时第二相脱溶符合固态相变的阶次规则，即通常在平衡脱溶相出现之前会出现一种或两种亚稳定结构，一般顺序为：

偏聚区（或称 GP 区）→过渡相（亚稳相）→平衡相

（预脱溶期：偏聚区（或称 GP 区）；脱溶期：过渡相（亚稳相）→平衡相）

脱溶时不直接析出平衡相的原因，是由于平衡相一般与基体形成新的非共格界面，而亚稳定脱溶物往往与基体完全或部分共格。非共格界面界面能大；亚稳定脱溶物界面界面

能小，界面能小，则形核功小，容易形成过渡结构；由过渡结构再演变成平衡稳定相。分三步走比一步脱溶容易进行。Al-Cu系合金即属这类脱溶过程。

但是，脱溶过程极为复杂，并非所有合金的脱溶均按同一顺序进行。某些铝合金脱溶序列见表2.12-48。

表2.12-48　某些铝合金脱溶序列表

合金	脱溶序列	平衡脱溶相
Al-Ag	偏聚区(球状)→γ'(片状)→$\gamma'(Ag_2Al)$	$\gamma'(Ag_2Al)$
Al-Cu	偏聚区(盘状)→θ''(盘状)→θ'→$\theta(CuAl_2)$	$\theta(CuAl_2)$
Al-Zn-Mg	偏聚区(球状)→η'(片状)→$\eta(MgZn_2)$	$\eta(MgZn_2)$
	↘ T'→$T(Mg_3Zn_3Al_2)$	$T(Mg_3Zn_3Al_2)$
Al-Mg-Si	偏聚区(杆状)→β'→$\beta(Mg_2Si)$	$\beta(Mg_2Si)$
Al-Cn-Mg	偏聚区(杆状或球状)→S'→$S(Al_2CuMg)$	$S(Al_2CuMg)$

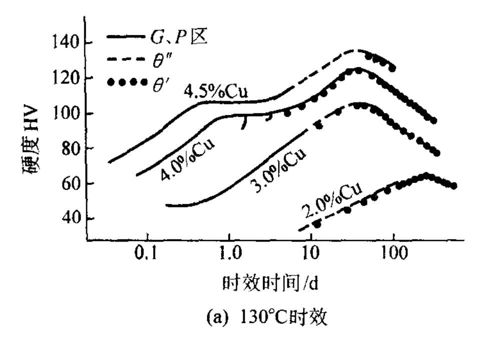
铝合金时效强烈引起性能的变化，对充分利用合金性能非常重要。

1）对力学性能的影响　以Al-Cu合金为例，时效过程对力学性能的影响举例见图2.12-22。

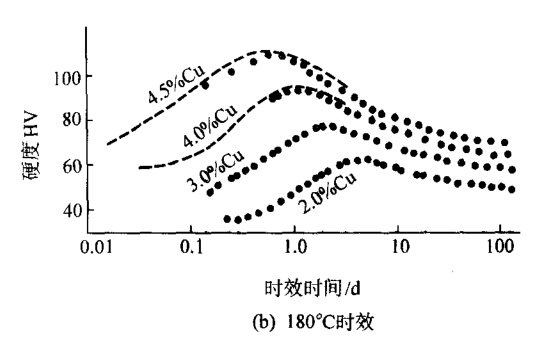
由图2.12-22可知，①在某一温度（如130℃或190℃），硬度随时间延长而增大，这叫时效硬化。②在130℃时效，曲线上有两个峰，第一个峰相当于偏聚区（GP区），第二个峰相当于θ''，均起硬化作用。一旦出现θ'，硬度开始下降，进入了过时效阶段。说明不同的脱溶物有不同的硬化效果。③不同成分合金在不同温度下具有不同的脱溶序列，过饱和度大的合金容易首先析出GP区。

2）对物理性能的影响　在低温时效过程中，许多合金电阻开始增加，然后降低，这种变化不仅与固溶体成分有关，也与组织变化有关。

3）对抗蚀性的影响　一般来讲单相固溶体合金具有较高的抗蚀性。脱溶后若脱溶相与基体有不同结构和成分，就会产生微电池作用，降低合金抗蚀性。



(a) 130°C时效



(b) 180°C时效

图2.12-22　Al-Cu合金时效硬度与时效时间和脱溶相结构的关系

影响时效过程及合金性能的因素有合金成分、塑性变形、固溶处理工艺、时效工艺等。

1）合金成分的影响　合金元素在α固溶体中溶解得愈多，时效硬化效果愈佳。如果合金元素含量超过了最大溶解度，时效硬化效果会慢慢降低，这是可以理解的，因为时效硬化主要是过饱和α固溶体起作用。

合金中存在少量元素或杂质，有时会影响过饱和固溶体分解过程及合金时效后的组织和性能。如少量（0.05%左右）可溶元素Cd、Sn、In和Be，对Al-4Cu-0.5Ti合金会减慢GP区形成速度，加速θ'的生成。因此，可以利用控制少量元素和杂质来调整时效效果。从另一个角度讲，对少量元素的杂质性质必须注意，不能随意加入或去除。

2）塑性变形的影响　铸件在淬火前清理往往会发生变形，淬火后时效前为了校直或校正零件，也会发生变形。淬火前变形加热时局部组织会发生再结晶。时效前变形会加速变形区在较高温度下的脱溶过程，延缓在较低温度下的脱溶过程，必然引起铸件内部组织和性能不均匀。

3）固溶处理（淬火）工艺的影响　在不发生过烧和过热的前提下，提高固溶处理温度可以加速时效过程，提高时效硬化效果。这是因为提高固溶处理温度，会使强化相溶解得更完全、合金成分更均匀，固溶处理后空位数增多，加速扩散过程，促进过饱和固溶体分解，有利于时效硬化。

4）时效工艺的影响　在正常时效温度下，随时效时间增长，合金的抗拉强度和硬度提高。如果时效温度比较高，达到最大值后会下降（图2.12-23T_2和T_3曲线），此时进入了过时效阶段。

若时效温度相当低，则不会发生过时效，硬化达到一定程度后就基本停止（图2.12-23T_1曲线），如Al-Cu合金室温时效（自然时效）就是这种情况。

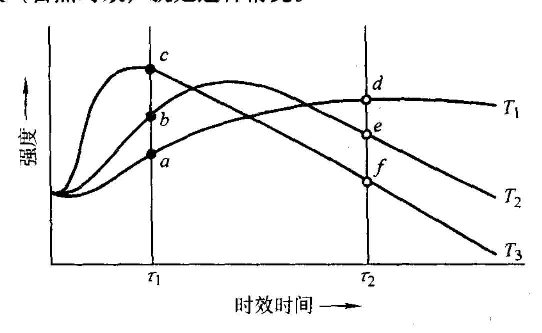


图2.12-23　在不同温度（$T_1<T_2<T_3$）下时效时强度与时效时间的关系示意图

4.2.4　淬火及时效工艺制订原则

（1）铸造铝合金淬火时效的特点

铸造铝合金组织较粗大，存在着枝晶偏析及针状或片状的金属间化合物。因为如此，淬火加热时强化相的溶解和时效时强化相的析出过程非常缓慢，加之铸件外形及断面形状多种多样，必然使热处理工艺具有下列特点。

1）形状复杂的大型铸件，加热速度应缓慢，防止变形，有时采取分段加热方法。

2）为了保证粗大强化相较彻底地溶解，加热时间应长些。

3）为了防止变形和开裂，冷却速度应尽可能地慢些，但必须保证达到热处理的目的，如在50～100℃水介质中淬火。

4）时效温度较高。根据铸件用途，时效温度在150～

330℃。高温时效实际是使铸件软化。

5）铸造状态，有的铸件就有淬火或部分淬火效应，即存在过饱和固溶体。

（2）淬火工艺制订原则

1）淬火加热温度 原则上可根据状态相图（图2.12-24）来确定。下限为固溶度曲线（ab），上限为固相线。热处理强化的工业铝合金含合金元素较多，往往有非平衡共晶体存在，开始熔化温度比固相线低，因此一般不超过共晶反应温度。就是合金元素含量不会出现共晶体组织，淬火温度要求也比较严格，允许波动范围很小（如±2～±3℃），还要注意温度的均匀性。

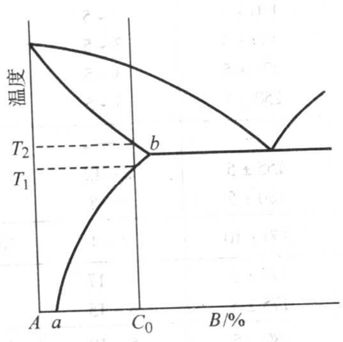


图2.12-24 选择淬火温度示意图

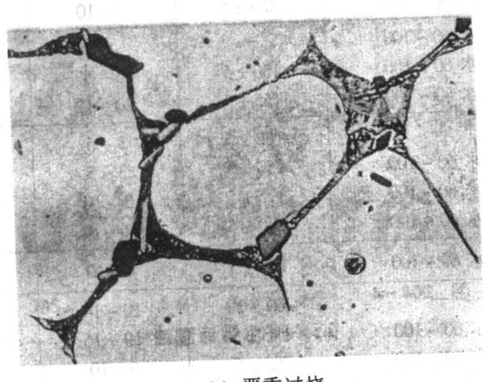
过烧是淬火加热时容易出现的问题。轻微过烧不易察觉，在显微镜下观察，晶界变宽，可能有少量球状易熔物；力学性能检测，冲击韧度下降。严重过烧时，晶界出现易熔物薄层，晶内有球状易熔物，晶粒粗大，晶界平直、氧化严重、有黑三角熔区甚至出现沿晶界裂纹。铸件表面颜色发暗，有时出现气泡等凸出颗粒。过烧组织见图2.12-25。

2）淬火加热保温时间 保温的目的是使过剩相充分溶解，成分均匀，组织转变为淬火需要的形态。保温时间应从加热到淬火温度下限算起，多长时间取决于合金成分，原始组织和加热温度。

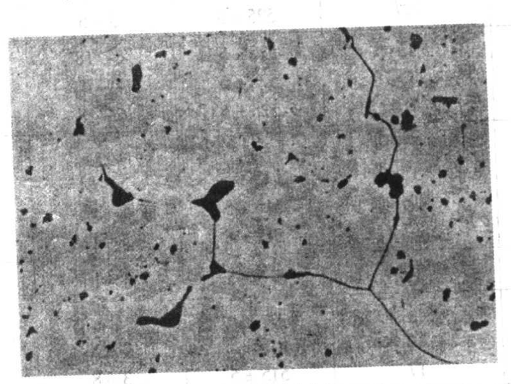
加热温度愈高，保温时间愈短。铸造铝合金中一般第二相较粗大，溶解速度慢，需要时间长。与装炉方法、数量和铸件厚度以及加热方式都有关系。装炉量多、铸件厚，保温时间就长。有热风循环加热炉比静止气体介质加热炉加热快，保温时间就短。

3）淬火冷却速度 淬火冷却速度很重要，取决于合金过饱和固溶体的稳定性。过饱和固溶体稳定性可根据C曲线（见图2.12-26）来制定。冷却速度V_C为临界冷却速度，小于V_C过饱和固溶体会分解，只能大于V_C进行淬火才能获得尽可能大的过饱和度，把高温状态保留下来。铝合金一般采用水中淬火。有时为了防止铸件变形，将水加热到一定温度，降低冷却速度。

从加热炉中取出来送到淬火池中，这个转移时间也很重要，因为转移过程中有温降。因此，淬火冷却应注意转移时间、铸件入水方向（减少变形）、淬火液冷却能力和铸件所需临界冷却速度。ZL203A合金淬火转移时间为小于20 s，其他合金为小于25 s。



(a) 严重过烧



(b) 轻微过烧

图2.12-25 ZL203合金过烧组织

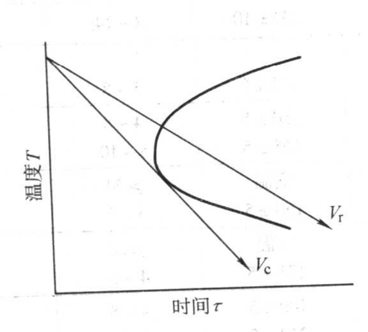


图2.12-26 临界冷却速度示意图

（3）时效工艺制订原则

企业用时效主要是等温时效或单级时效。即在一定温度下保温一定时间，达到所要求的性能。这种工艺简单，但不能充分发挥出合金的性能。有时有的合金采取分级时效，即先在某一温度下保温一段时间，然后再在另一温度（或高或低）下保温一段时间，完成全时效过程。

等温时效分自然时效和人工时效。在室温进行的时效叫自然时效。在淬火后又加热到某一温度，保持一定时间，叫人工时效。大多数铝合金在室温不能自然时效，或时效效果不大，只有采用人工时效。Al-Cu系合金自然时效硬化效果好。

有时也有采用不完全人工时效的，温度较低，时间较短，虽然未达到最高强度和硬度，塑性较好。也有采用过时效的，组织稳定，具有较好的综合力学性能和抗蚀性能。过时效温度较高，时间较长，使铸件性能和尺寸稳定，也叫稳定化时效。高温下工作的铸件，为保证铸件性能和尺寸稳定性，一般都采用过时效或稳定化时效处理。

分级时效，即先在较低的温度时效一定时间，然后再在较高的温度时效。与高温一次时效相比，分级时效会使脱溶相密度更高，分布更均匀，合金有较好的力学及抗应力腐蚀等综合性能。先高温时效后低温时效应用较少。

在实际生产中，淬火和时效工艺参数，往往通过实验来确定。这些参数，如淬火加热时间，保温时间，淬火冷却速度，时效温度及时效时间之间的关系是互相关联的，都应该是最佳的，是一个统一体，其中任何一个参数对合金最终性

能都会带来影响。因此，以理论为根据，按原则选取各参数的范围，最终还要用实验来确定。

淬火后到时效之间存放，对一些合金是有影响的。一般不要超过 8 h，就是美国的 201.0 合金存放时间也不要超过 24 h。

4.3 铸造铝合金常用的热处理工艺

各种铸造铝合金铸件热处理工艺参数见表 2.12-49。

表 2.12-49 铸造铝合金热处理工艺参数

合金代号	热处理状态及铸造方法	固溶处理（淬火）			时效		
		加热温度/℃	保温时间/h	冷却介质及温度/℃	加热温度/℃	保温时间/h	冷却介质
ZL101	T2	—	—	—	300 ± 10	2 ~ 4	空气或随炉冷
	T4	535 ± 5	2 ~ 6	水 60 ~ 100	室温	≥24	—
	T5	535 ± 5	2 ~ 6	水 60 ~ 100	150 ± 5	3 ~ 5	空气
	T6	535 ± 5	2 ~ 6	水 60 ~ 100	200 ± 5	3 ~ 5	空气
	T7	535 ± 5	2 ~ 6	水 60 ~ 100	225 ± 5	3 ~ 5	空气
	T8	535 ± 5	2 ~ 6	水 60 ~ 100	250 ± 5	3 ~ 5	空气
ZL101A	T4	535 ± 5	6 ~ 12	水 65 ~ 100	—	—	—
	T5	535 ± 5	6 ~ 12	水 65 ~ 100	155 ± 5	2 ~ 12	空气
	T6	535 ± 5	6 ~ 12	水 65 ~ 100	180 ± 5	3 ~ 8	空气
ZL102	T2	—	—	—	300 ± 10	2 ~ 4	空气或随炉冷
ZL104	T1	—	—	—	175 ± 5	3 ~ 17	空气
	T6	535 ± 5	2 ~ 6	水 60 ~ 100	175 ± 5	8 ~ 15	空气
ZL105	T1	—	—	—	180 ± 5	5 ~ 10	空气
	T5	525 ± 5	3 ~ 5	水 60 ~ 100	175 ± 5	3 ~ 10	空气
	T7	525 ± 5	3 ~ 5	水 60 ~ 100	225 ± 5	3 ~ 10	空气
ZL105A	T4	525 ± 5	6 ~ 18	水 60 ~ 100	—	—	—
	T5	525 ± 5	4 ~ 12	水 60 ~ 100	160 ± 5	3 ~ 5	空气
	T6	525 ± 5	6 ~ 18	水 60 ~ 100	155 ± 5	10 ~ 12	空气
ZL106	T1	—	—	—	180 ± 5	3 ~ 5	空气
	T5	515 ± 5	5 ~ 12	水 60 ~ 100	150 ± 5	3 ~ 5	空气
	T6	515 ± 5	5 ~ 12	水 60 ~ 100	175 ± 5	3 ~ 10	空气
	T7	515 ± 5	5 ~ 12	水 60 ~ 100	230 ± 5	6 ~ 8	空气
ZL107	T6	515 ± 5	8 ~ 10	水 60 ~ 100	165 ± 5	6 ~ 10	空气
ZL108	T1	—	—	—	200 ± 10	10 ~ 14	空气
	T6	515 ± 5	3 ~ 8	水 60 ~ 100	180 ± 5	10 ~ 16	空气
	T7	515 ± 5	3 ~ 8	水 60 ~ 100	205 ± 5	6 ~ 10	空气
ZL109	T1	—	—	—	205 ± 5	6 ~ 10	空气
	T6	500 ± 5	4 ~ 6	水 65 ~ 100	184 ± 5	10 ~ 14	空气
ZL110	T1	—	—	—	200 ± 10	8 ~ 14	空气
ZL111	T6	分级 505 ± 5	4 ~ 6				空气
		520 ± 5	6 ~ 8	水 60 ~ 100	175 ± 5	5 ~ 8	空气
ZL111A	T5	535 ± 5	4 ~ 6	水 60 ~ 100	160 ± 5	4 ~ 8	空气
	T6	535 ± 5	6 ~ 10	水 60 ~ 100	165 ± 5	5 ~ 10	空气
ZL115	T4	540 ± 5	10 ~ 12	水 60 ~ 100	室温	≥24	—
	T5	540 ± 5	10 ~ 12	水 60 ~ 100	150 ± 5	3 ~ 5	空气
ZL116	T4	535 ± 5	8 ~ 12	水 60 ~ 100	室温	≥24	—
	T5	535 ± 5	8 ~ 12	水 60 ~ 100	175 ± 5	4 ~ 8	空气
ZL117	T6	510 ± 5	4 ~ 12	水 60 ~ 100	180 ± 5	4 ~ 8	空气
	T7	510 ± 5	4 ~ 12	水 60 ~ 100	210 ± 5	3 ~ 8	空气
ZL201	T4	分级 530 ± 5	5 ~ 9				
		540 ± 5	5 ~ 9	水 60 ~ 100	室温	≥24	—
	T5	分级 530 ± 5	5 ~ 9				
		540 ± 5	5 ~ 9	水 60 ~ 100	175 ± 5	3 ~ 5	空气
ZL201A	T4	分级 530 ± 5	5 ~ 9				
		542 ± 5	5 ~ 9	水 60 ~ 100	室温	≥24	—
	T5	分级 530 ± 5	5 ~ 9				
		542 ± 5	5 ~ 9	水 60 ~ 100	175 ± 5	3 ~ 5	空气
ZL201A	T5	分级 535 ± 5	7 ~ 9				
		545 ± 5	7 ~ 9	水 60 ~ 100	160 ± 5	6 ~ 9	

续表 2.12-49

合金代号	热处理状态及铸造方法	固溶处理（淬火）			时效		
		加热温度/℃	保温时间/h	冷却介质及温度/℃	加热温度/℃	保温时间/h	冷却介质
ZL203	T4 T5	515±5 515±5	10~16 10~15	水60~100 水60~100	室温 150±5	≥24 2~4	— 空气
ZL204A	T6	538±5	10~18	水室温~60	175±5	3~5	空气
ZL205A	T5 T6 T7	538±5 538±5 538±5	10~18 10~18 10~18	水室温~60 水室温~60 水室温~60	154±5 175±5 190±5	8~10 4~6 2~4	空气 空气 空气
ZL207	T1	—	—	—	200±5	5~10	空气
ZL208	T5	540±5	4~6	沸水	215±5	15~17	随炉冷至150℃后空冷
ZL301	T4	430±5	12~20	沸水或油50~100	室温	≥24	—
ZL303	T1 T4	— 425±5	— 15~20	— 沸水或油50~100	175±5 室温	4~6 ≥24	空气 —
ZL305	T4	分级435±5 490±5	8~10 6~8	沸水或油50~100	室温	≥24	空气
ZL401	T1	—	—	—	200±10	5~10	空气
ZL402	T1	—	—	—	180±5	8~10	空气

冷热循环处理（见表2.12-50），由于多次加热和冷却引起铸件收缩和膨胀，消除应力，组织处于更加稳定的状态，从而提高铸件尺寸的稳定性，适于精密零件的制造。

表2.12-50 冷热循环处理（T9）工艺

序号	规范名称	温度/℃	时间/h	冷却转移形式
GJB 1695—1993				
1	正温处理 负温处理 正温处理	135~145 ≤-50 135~145	4~6 2~3 4~6	空冷 在空气中回复到室温 随炉冷至小于等于60℃取出
2	正温处理 负温处理 正温处理	115~125 ≤-50 115~125	6~8 6~8 6~8	空冷 在空气中回复到室温 随炉冷至室温
QJ 1703A—1998				
1	正温处理 负温处理 正温处理	130±5 ≤-50 130±5	3~6 2~3 3~6	空冷后或直接转入负温 直接或室温停留后转入正温 炉冷或空冷
2	正温处理 负温处理 正温处理 负温处理 正温处理 负温处理 正温处理	120±5 ≤-50 120±5 ≤-50 120±5 ≤-50 120±5	3~6 2~3 3~6 2~3 3~6 2~3 3~6	空冷后或直接转入负温 直接或室温停留后转入正温 空冷后或直接转入负温 直接或室温停留后转入正温 空冷后或直接转入负温 直接或室温停留后转入正温 炉冷或空冷
3	正温处理 负温处理 正温处理	100±5 ≤-196 100±5	4~6 2 4~6	空冷后或直接转入负温 空气中回复到室温后转入正温 炉冷或空冷

4.4 热处理设备

4.4.1 热处理炉

铝合金铸件组织一般存在共晶体，而固溶处理加热温度要求又高，如接近共晶体熔点，容易过烧。时效效果与温度高低关系密切，几度之差就达不到要求。因此，对热处理炉的温度波动范围严格限制，如一般为±5℃，要求高的±3℃。要想达到这一要求，热处理炉应装有热风循环系统，保证炉温均匀，而且热效率高。加热元件与铸件之间屏蔽，热源不能直接对铸件照射，避免局部过热过烧。

困难的是测温和控温的准确性。这一点必须注意，没有准确的测温和控温设施，谈不上能严格执行铝合金热处理工艺制度。小热处理炉好办，大热处理炉测温点要多而且合理分布才行。

固溶化（淬火）加热炉一般与时效（包括退火）炉分开，应是专用的。

淬火和时效加热炉，有箱式的、井式的和台车式的，多为电阻炉。目前也有采用油（气）燃烧机加热的。小批量生产一般用箱式的或井式的，设备费用低，占地面积小。特别是井式的，升温快，保温性能好。大批量大件生产采用连续工作的台车式炉较好，操作方便，生产率高，热效率高。

铸件热处理装炉也很重要，合金牌号不同的铸件，不能混装。铸件摆放（有的用框架，有的用网篮）注意通风和不要压挤变形，还要考虑如何出炉和淬火方向。

4.4.2 淬火冷却设备

淬火冷却需在冷却介质中冷却，设淬火槽。时效与退火一般空冷，不设冷却槽。

1）淬火槽　淬火槽距加热炉一般不超过1.5 m。有活动炉底的，设在料架下边。主要是尽量缩短铸件出炉到淬火的转移时间。

淬火槽应有加热、冷却装置和循环装置，保证水温均匀。要有足够的容量，保证铸件淬火迅速均匀冷却。

2）淬火冷却介质　冷却能力愈高愈能保证获得 α 固溶体的过饱和度。介质冷却能力排列：干冰和丙酮的混合物（-68℃）、冰水、室温下的水、80~90℃的水、沸水、油、200~220℃油和空气。

淬火冷却介质的选择，以在淬火温度下的 α 固溶体淬火冷却时不发生分解为原则，不是冷却能力愈大愈好。因为，淬火冷却速度太快，残留应力大，铸件容易变形甚至开裂。常用铝合金淬火冷却介质见表2.12-51。

4.5 热处理缺陷及其防止方法

热处理常见缺陷及其防止方法见表2.12-52。

表 2.12-51 常用铝合金淬火介质

名称	型号	技术条件	冷却速度/℃·s^{-1}	特点及用途
水	—	—	177（在30℃时）	通用、廉价
油	—	—	90～110（在50℃时）	主要适用于 Al-Mg 合金
有机淬火介质	CL-1	外观：淡黄色至黄色黏稠均匀液体 逆熔点：80～87℃ 密度：1.085 7～1.123 4 g/cm^3 折光 n：1.413 8～1.445 0 黏度 η：≥154 MPa·s 临界冷却速度（450～260℃）：≥260℃/s 凝固温度：－27℃	冷却速度介于水和油之间	1）可以与水以任意比例互溶，其浓度不同，冷却速度也不同，故可以调整冷却能力 2）清洗性能良好，淬火后铸件表面光洁，无污染，不需再清洗而且无害无毒。该淬火介质还具有防锈能力，耐寒性能好
水基淬火介质	AQ25-1	外观：半透明浅黄色液体 密度：1.078（15℃）g/cm^3 比热容：0.95 J/（kg·K）（15%的水溶液） 热导率：0.546 W/（m·K）（15%的水溶液） 黏度：原液 300 MPa·s±20 MPa·s 10%的水溶液 1.90 MPa·s	冷却速度介于水和油之间	无油烟，不燃烧，可以任意比例与水混合，调整其冷却能力。不易老化变质，使用寿命长

表 2.12-52 热处理常见缺陷及其消除方法

缺陷	特征	形成原因	消除方法
力学性能不合格	退火状态 伸长率 δ_5 偏低；固溶处理状态抗拉强度 σ_b 和伸长率 δ_5 不合格，时效后抗拉强度 σ_b 和伸长率 δ_5 不合格	1）铸件退火时，退火温度偏低或保温时间不足，或冷却速度太快 2）固溶处理时，温度过低或保温时间不够，淬火转移时间过长或淬火水温过高 3）不完全人工时效和完全人工时效温度偏高或时间过长而造成抗拉强度 σ_b 高而伸长率 δ_5 不合格，温度低而时间短使抗拉强度 σ_b 低而伸长率 δ_5 偏高 4）合金化学成分的偏差	1）再次退火，提高温度，或延长保温时间，或严格随炉冷却 2）将固溶温度提高到上限，或延长保温时间，尽量缩短淬火转移时间，或在保证淬火不变形不开裂的情况下降低淬火水温或更换淬火介质 3）再次固溶处理后调整时效的温度和时间 4）根据具体化学成分，重复热处理时调整热处理规范。并对下批铸件调整化学成分
淬火不均匀	铸件不同部位具有不同的力学性能，如厚大部位力学性能低，硬度低，甚至不合格	铸件局部加热和冷却不均，如厚大部位和薄小的部位加热和冷却不均，厚大部位热透慢，冷却慢	1）重新进行热处理，使厚大部位处于炉内的高温区，或延长保温时间 2）使厚大部位先下水冷却 3）更换冷却介质 4）铸件上涂涂料，使其均匀加热和冷却
变形	热处理及随后的切削加工中铸件出现的形状变化和尺寸变化	1）加热速度过快 2）冷却太激烈 3）壁厚差大 4）装料不当，下水方式不对	1）降低升温速度 2）更换冷却介质或提高介质温度 3）厚壁或薄壁部位涂涂料 4）采用适当夹具，选择正确的下水方向 5）淬火后立即对铸件进行矫正
裂纹	经热处理后的铸件上出现裂纹，或者肉眼可见，或者荧光灯检验发现，其断口一般有氧化现象	1）加热速度过快 2）淬火冷却太激烈 3）壁厚差大 4）装料方法不对 5）化学成分不正确	1）降低升温速度 2）更换冷却介质，或提高介质温度，或采用等温淬火 3）壁厚或壁薄部位涂涂料 4）采用适当夹具，选择正确的下水方向 5）选择最合适的化学成分
过烧	铸件表面有由于局部熔化所产生的结瘤；力学性能，特别是伸长率 δ_5 下降；金相组织中出现复熔物等	1）低熔点杂质元素含量偏高 2）不均匀地加热和加热过快，使铸件局部加热温度超过过烧温度 3）炉内工作区的温度局部超过过烧温度 4）测量和控温仪表失灵，使炉温过高	1）选用合格炉料 2）选用合理的升温速度 3）分段加热 4）定期校测炉内各加热区的温度，使之不大于±3℃或±5℃，个别偏高的部位不予装料 5）定期校正仪表，保证测温和控温准确无误
腐蚀	盐浴处理在铸件表面上，特别是在铸件有疏松的部位出现腐蚀斑点	1）熔融盐的氯化物过高 2）处理后，硝盐未洗干净	1）保证氯离子含量不超过规定 2）铸件清洗干净

编写：田荣璋（中南大学）
审稿：唐仁政（中南大学）

参考文献

1 王祝堂，田荣璋主编．铝合金及其加工手册．第二版．长沙：中南大学出版社，2000

2 机械工程手册编辑委员会．机械工程手册：工程材料卷．第2版．北京：机械工业出版社，1994

3 李松瑞，周善初．金属热处理．北京：中南大学出版社，2003

4 王祝堂主编．铝材及其表面处理手册．南京：江苏科学技术出版社，1992

5 师昌绪等主编．材料科学与工程手册．北京：化学工业出版社，2004

6 机械工程学会铸造分会编．铸造手册．铸造非铁合金．第2版．北京：机械工业出版社，2002

7 中国航空材料手册编委会．中国航空材料手册：第3卷．第2版．北京：中国标准出版社，2002

8 刘静安，谢水生．铝合金材料的应用与技术开发．北京：冶金工业出版社，2004

9 美国金属学会．金属手册：第2卷．第9版．范玉殿，张效忠译．北京：机械工业出版社，1994

10 杨重愚．轻金属冶金学．北京：冶金工业出版社，1991

11 彭大署主编．金属塑性加工原理．长沙：中南大学出版社，2004

12 武恭编．铝及铝合金材料手册．北京：科学出版社，1994

13 V. G. Davydov, T. D. Rostova, V. V. Zakharov, Y. A. Filatov, V. I. Yelagin. Scientific principles of making an alloying addition of scandium to aluminum alloys. Materials Science and Engineering, A, Vol. 280, 1, 2000, 30 ~ 36

14 Z. M. Yin, Q. L. Pan, Y. H. Zhang, F. Jiang. Effect of minor Sc and Zr on the microstructure and mechanical properties of Al-Mg based alloys. Materials Science and Engineering, A, Vol. 280, 1, 2000, 151 ~ 155

15 尹志民，杨磊等．微量钪和锆对Al-Zn-Mg合金组织性能的影响．2000年工程材料科学与工程新进展．北京：冶金工业出版社，2001

第3篇

镁及镁合金

主 编 黎文献

主 审 田荣璋

编 写 黎文献 余 琨 马正青

审 稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会

第1章 概　述

镁属轻金属，纯镁在室温时的密度为1.736 g/cm³，约为铝的密度的2/3，钢的密度的1/4。镁可以通过有效合金化制备合金，大多数镁合金的密度为1.3～1.9 g/cm³，最轻的Mg-Li合金仅为0.95 g/cm³，可浮于水面。

镁合金具有高的比强度和比刚度，尺寸稳定性高，减振性能、导热性能、铸造性能和可切削加工性能良好，是目前工业上应用最轻的金属结构材料和特殊用途的功能材料。镁合金可以回收利用，对环境友好，因此又誉为21世纪的绿色工程金属结构材料。

镁资源在全球范围内十分丰富，它以化合物的形式存在于地壳、海水及盐湖水中。在地壳中多以菱镁矿（$MgCO_3$）、白云石（$MgCO_3 \cdot CaCO_3$）、光卤石（$KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$）和水氯镁石（$MgCl_2 \cdot 6H_2O$）等状态存在，镁约占地壳质量的2.3%，在海水中含量达1.1 kg/m³，因此，几乎可以认为镁是取之不尽，用之不竭的金属元素。

在工业上，金属镁的生产方法有以下两类。

第一类是熔盐电解法，即将氯化镁熔盐电解

$$MgCl_2 \xrightarrow{\text{电解}} Mg + Cl_2$$

主要包括$MgCl_2$的生产以及熔融$MgCl_2$电解制取金属镁两大过程。

第二类是金属热还原法，即用硅铝、硅铁、硅钙等合金从氧化镁中将镁还原出来。它又分为内热法和外热法，外热法所需温度较低，即所谓皮江法（Pidgeon Method）。

皮江法以白云石、硅铁和萤石等为原料，研成粉体后制成球团，置于1 150～1 200℃的还原罐中进行还原反应：

$$2(CaO \cdot MgO) + Si = 2CaO \cdot SiO_2 + 2Mg$$

镁蒸气在还原罐的结晶器中冷凝成固态镁。

镁的主要生产国为中国、俄罗斯、美国、加拿大、挪威、澳大利亚、以色列等国，2003年全世界镁产量约为51万吨，中国镁产量35.4万吨，出口（包括纯镁，镁合金等）约30万吨。2004年中国镁产量45万吨，出口38万吨。因此，中国是世界上镁的生产大国，也是出口大国。我国镁的生产主要采用皮江法，国外以电解法生产为主。

镁合金的开发和应用始于20世纪20年代，发展速度较钢和铝合金缓慢，其原因首先是镁的氧化膜不致密，耐蚀性能不及铝合金，镁的晶体结构为密排六方，塑性加工较困难，而其他优点却没有充分被人们所认识。同时塑料作为轻质材料成为镁合金的竞争对手。随着科学技术的发展，对镁合金生产应用的一些技术问题逐步解决，塑料对环境造成的危害以及镁合金对节能环保方面的突出优点逐渐被人们所认识，镁合金已走上了加速发展的阶段。

镁当前在工业上的应用大约50%作为铝合金添加元素，用于钢脱硫和球墨铸铁约18%，用于镁合金压铸件约28%，用作变形镁合金仅1%左右，其余用作化学元素、金属还原、阳极保护、固体燃料、烟花等，由此可见，镁作为工程材料应用、研究、开发远远不够。“在材料领域还没有任何材料像镁那样潜力与现实有如此大的颠倒。”

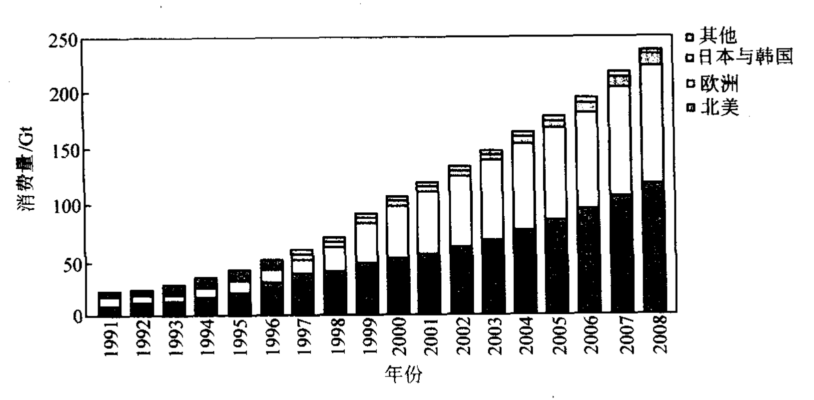


图3.1-1　压铸镁合金的消费

20世纪末，由于人们对节能、环保的共识和迫切需求，同时也由于镁的冶炼技术、表面保护技术的发展，世界各国，特别是工业发达国家对镁的开发和应用给予了新的重视。首先是交通运输领域，特别是汽车工业，由于镁具有质轻、减震等显著特点，对于减轻汽车质量、节油、减少CO_2排放可带来很大效益，世界各大汽车公司纷纷采用镁合金铸件作为汽车零件，根据国际镁业协会（International Magnesium Association-IMA）的统计和预测，压铸镁合金的发展速度很快，如图3.1-1所示。其中80%以上是用于汽车工业。其次是用于所谓3C（Computers、Communications、Consumer elecfronics）产品，如计算机外壳、手机外壳、电视机壳体和办公用品等。

镁铸造技术的进步，特别是压铸、流变铸造、触变铸造（Thixomolding）的开发，加之镁合金铸造性能良好，促进了铸造镁合金的发展和应用。但是变形镁合金的性能明显优于铸造镁合金（如图3.1-2所示）。镁合金要能大量地用作结构材料，必须发展变形镁合金制品——板材、挤压材和锻件，与铸造镁合金产品相比较，其强度、塑性、综合力学性能更好，成本更低。更能发挥其性能优势的潜在应用领域应该是航空、航天和其他高新技术领域。

稀土元素能提高镁合金的耐热性能、抗蠕变性能、耐腐蚀性能，改善工艺性能，含稀土镁合金的研究是开发新型镁合金的一个重要方向。Mg-Li合金是目前最轻的结构材料，由于Li加入到一定含量的时候，可将Mg的密排六方结构转

变为体心立心结构，大大改善其塑性加工性能，而且 Mg-Li 合金可时效强化，具备超塑成形性能，有着十分诱人的发展前景。

快速凝固技术被视为开发高性能镁合金蹬先进技术，美国已开发出快速凝固工程镁合金，其抗拉强度、伸长率、抗压屈服强度与抗拉屈服强度的比值，以及耐蚀性能等与普通熔铸法（IM）制备的镁合金相比，性能有了显著的提高，成为已报道的性能最佳的变形镁合金材料，希望应用于飞机及汽车领域，快速凝固是制备高性能变形镁合金的先进技术和发展方向。

镁合金通过成分和工艺的控制，特别是快速凝固镁合金，可具有超塑成形性能，为镁合金加工困难提供了新的技术途径。

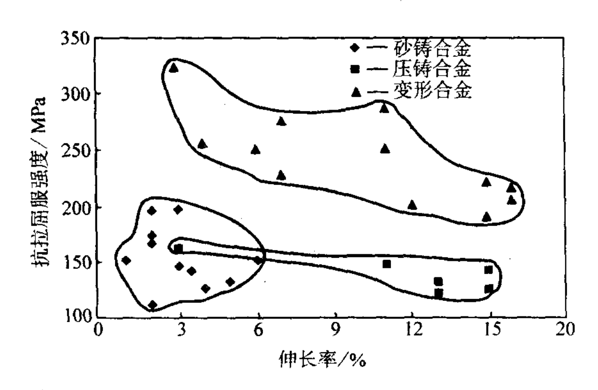


图 3.1-2 变形镁合金与铸造镁合金力学性能的对比

镁基合金与陶瓷颗粒有很好的相容性，制成镁基复合材料可提高镁合金的刚度，降低线胀系数，提高强度、耐磨性和蠕变抗力等综合性能，增加了镁合金与其他轻质材料的竞争能力。

一些二元和三元镁合金具有很好的非晶形成能力。

由此可见，镁合金具有很多潜在的优良性能和制备技术有待开发，它将成为21世纪优秀的轻质材料。

迄今为止，与铝合金相比，镁的合金牌号较少，主要的合金系有 Mg-Al 系、Mg-Zn 系、Mg-RE 系合金，它又根据合金产品制备方法不同，分为铸造合金和变形合金两大类。

我国镁合金牌号表示方法按以下规则。

1）纯镁牌号以 Mg 加数字的形式表示，Mg 后面的数字表示 Mg 的百分含量。

2）镁合金牌号以英文字母加数字再加英文字母的形式表示，前面的英文字母是其最主要的合金组成元素代号（见表 3.1-1），其后的数字表示最主要的合金组成元素的大致含量。最后面的英文字母为标识代号，用以标识各具体组成元素相异或元素含量有微小差别的不同合金。

我国铸造镁合金锭和变形镁合金牌号及化学成分见表 3.1-2 和表 3.1-3，新、旧牌号对照见表 3.1-4，我国各主要铸造镁合金和各主要变形镁合金与国外标准相似牌号对照见表 3.1-5 和表 3.1-6。

表 3.1-1 镁合金牌号元素代号

元素代号	元素名称	元素代号	元素名称
A	铝	M	锰
B	铋	N	镍
C	铜	P	铅
D	镉	Q	银
E	稀土	R	铬
F	铁	S	硅
G	钙	T	锡
H	钍	W	钇
K	锆	Y	锑
L	锂	Z	锌

我国镁合金新牌号与美国牌号相近。由于美国的镁合金牌号相对较多，我国镁合金新牌号尚待实施，所以近期我国镁合金的牌号多采用美国牌号。本篇中所涉及到的镁合金牌号也采用美国牌号。

表 3.1-2 中国铸造镁合金锭的化学成分（摘自 GB/T 19078—2003）

合金级别	牌号	对应EN1753的数字牌号	化学成分（质量分数）/%															
			Mg	Al	Zn	Mn	RE	Zr	Ag	Y	Li	Be	Si	Fe	Cu	Ni	其他元素⑤ 单个	其他元素⑤ 总计
MgAlZn	AZ81A	—	余量	7.2~8.0	0.50~0.90	0.15~0.35	—	—	—	—	—	0.000 5~0.001 5	≤0.20	—	≤0.08	≤0.010	—	≤0.30
	AZ81S	MB21110	余量	7.2~8.5	0.45~0.90	0.17~0.40	—	—	—	—	—	—	≤0.05	≤0.004	≤0.025	≤0.001	≤0.01	—
	AZ91D	MB21120	余量	8.5~9.5	0.45~0.90	0.17~0.40	—	—	—	—	—	0.000 5~0.003	≤0.05	≤0.004	≤0.025	≤0.001	≤0.01	—
	AZ91S	MB21121	余量	8.0~10.0	0.30~1.00	0.10~0.50	—	—	—	—	—	—	≤0.30	≤0.03	≤0.20	≤0.010	≤0.05	
	AZ63A	—	余量	5.5~6.5	2.7~3.3	0.15~0.35	—	—	—	—	—	0.000 5~0.001 5	≤0.05	≤0.005	≤0.015	≤0.001	—	≤0.30
MgAlMn	AM20S	MB21210	余量	1.7~2.5	≤0.20	0.35~0.60	—	—	—	—	—	—	≤0.05	≤0.004	≤0.008	≤0.001	≤0.01	—
	AM50A	MB21220	余量	4.5~5.5	≤0.20	0.28~0.50	—	—	—	—	—	0.000 5~0.003	≤0.005	≤0.004	≤0.008	≤0.001	≤0.01	—
	AM60B	MB21230	余量	5.6~6.4	≤0.20	0.26~0.50	—	—	—	—	—	0.000 5~0.003	≤0.05	≤0.004	≤0.008	≤0.001	≤0.01	—
	AM100A	—	余量	9.4~10.6	≤0.20	0.13~0.35	—	—	—	—	—	—	≤0.02	≤0.004	≤0.08	≤0.010	—	≤0.30
MgAlSi	AS21S	MB21310	余量	1.9~2.5	≤0.20	0.20~0.60	—	—	—	—	—	—	0.70~1.20	≤0.004	≤0.008	≤0.001	≤0.01	
	AS41B	—	余量	3.7~4.8	≤0.10	0.35~0.60	—	—	—	—	—	0.000 5~0.003	0.60~1.40	≤0.003 5	≤0.015	≤0.001	≤0.01	—
	AS41S	MB21320	余量	3.7~4.8	≤0.20	0.20~0.60	—	—	—	—	—		0.70~1.20	≤0.004	≤0.008	≤0.010	≤0.01	
MgZnCu	ZC63A	MB32110	余量	≤0.2	5.5~6.5	0.25~0.60	—	—	—	—	—	—	≤0.20	≤0.05	2.4~3.00	≤0.001	≤0.01	≤0.30
MgZnZr	ZK51A	—	余量	—	3.8~5.3	—	—	0.3~1.0	—	—	—	—	≤0.01	—	≤0.03	≤0.010	—	≤0.30
	ZK61A	—	余量	—	5.7~6.3	—	—	0.3~1.0	—	—	—	—	≤0.01	—	≤0.03	≤0.010	—	≤0.30
MgZr	KIA	—	余量	—	—	—	—	0.3~1.0	—	—	—	—	≤0.01	—	≤0.03	≤0.010	—	≤0.30

续表 3.1-2

合金级别	牌号	对应EN1753的数字牌号	化学成分（质量分数）/%														其他元素⑤	
			Mg	Al	Zn	Mn	RE	Zr	Ag	Y	Li	Be	Si	Fe	Cu	Ni	单个	总计
MgZnREZi[①]	ZE41A	MB35110	余量	—	3.7~4.8	≤0.15	1.00~1.75	0.3~1.0	—	—	—	—	≤0.01	≤0.01	≤0.03	≤0.005	≤0.01	≤0.30
	EZ33A	MB65120	余量	—	2.0~3.0	≤0.15	2.6~3.9	0.3~1.0	—	—	—	—	≤0.01	≤0.01	≤0.03	≤0.005	≤0.01	≤0.30
MgREAgZr[②]	QE22A	—	余量	—	≤0.20	≤0.15	1.9~2.4	0.3~1.0	2.0~3.0	—	—	—	≤0.01	—	≤0.03	≤0.010	—	≤0.30
	QE22S	MB65210	余量	—	≤0.20	≤0.15	2.0~3.0	0.3~1.0	2.0~3.0	—	—	—	≤0.01	≤0.01	≤0.03	≤0.005	≤0.01	—
	EQ21A	—	余量	—	—	—	1.5~3.0	0.3~1.0	1.3~1.7	—	—	—	≤0.01	—	0.05~0.10	≤0.010	—	≤0.30
	EQ21S	MB65220	余量	—	≤0.20	≤0.15	1.5~3.0	0.1~1.0	1.3~1.7	—	—	—	≤0.01	≤0.01	0.05~0.10	≤0.005	≤0.01	—
MgYREZr[③④]	WE54A	MB95310	余量	—	≤0.20	≤0.15	1.5~4.0	0.3~1.0	—	4.75~5.50	≤0.20	—	≤0.01	≤0.01	≤0.03	≤0.005	≤0.01	≤0.30
	WE43A	MB95320	余量	—	≤0.20	≤0.15	2.4~4.4	0.3~1.0	—	3.70~4.30	≤0.20	—	≤0.01	≤0.01	≤0.03	≤0.005	≤0.01	≤0.30

注：需方对化学成分有特殊要求时，可与供方协商。

① 稀土中富铈。

② 稀土中富钕。钕含量（质量分数）不小于70%。

③ 稀土中富钕和重稀土，WE54A、WE43A含稀土元素钕（质量分数）分别为1.5%~2.0%、2.0%~2.5%，余量为重稀土。

④ 如下调整成分（质量分数）可改善合金抗蚀能力：Mn≤0.03%，Fe≤0.01%，Cu≤0.02%，Zn+Ag≤0.2%。

⑤ 其他元素是指在本表表头中列出了元素符号，但在本表中却未规定极限数值含量的元素。

表 3.1-3 中国变形镁及镁合金牌号及化学成分（摘自 GB/T 5153—2003）

合金	牌号	对应 ISO3116 的数字牌号	化学成分/%													其他元素	
			Mg	Al	Zn	Mn	Ce	Zr	Si	Fe	Ca	Cu	Ni	Ti	Be	单个	总计
Mg	Mg99.95	—	≥99.95	≤0.001	—	≤0.004	—	—	≤0.005	≤0.003	—	—	≤0.001	≤0.01	—	≤ 0.005	≤0.05
	Mg99.50	—	≥99.50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	≤0.50
	Mg99.00	—	≥99.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	≤1.0
MgAlZn	AZ31B	—	余量	2.5～3.5	0.60～1.4	0.20～1.0	—	—	≤0.08	≤0.003	≤0.04	≤0.01	≤0.001	—	—	≤0.05	≤0.30
	AZ31S	ISO－WD21150	余量	2.4～3.6	0.50～1.5	0.15～0.40	—	—	≤0.10	≤0.005	—	≤0.05	≤0.005	—	—	≤0.05	≤0.30
	AZ31T	ISO－WD21151	余量	2.4～3.6	0.50～1.5	0.05～0.40	—	—	≤0.10	≤0.05	—	≤0.05	≤0.005	—	—	≤0.05	≤0.30
	AZ40M	—	余量	3.0～4.0	0.20～0.80	0.15～0.50	—	—	≤0.10	≤0.05	—	≤0.05	≤0.005	—	≤0.01	≤0.01	≤0.30
	AZ41M	—	余量	3.7～4.7	0.80～1.4	0.30～0.60	—	—	≤0.10	≤0.05	—	≤0.05	≤0.005	—	≤0.01	≤0.01	≤0.03
	AZ61A	—	余量	5.8～7.2	0.40～1.5	0.15～0.50	—	—	≤0.10	≤0.005	—	≤0.05	≤0.005	—	—	—	≤0.30
	AZ61M	—	余量	5.5～7.0	0.50～1.5	0.15～0.50	—	—	≤0.10	≤0.05	—	≤0.05	≤0.005	—	≤0.01	≤0.01	≤0.30
	AZ61S	ISO－WD21160	余量	5.5～6.5	0.50～1.5	0.15～0.40	—	—	≤0.10	≤0.005	—	≤0.05	≤0.005	—	—	≤0.05	≤0.30
	AZ62M	—	余量	5.0～7.0	2.0～3.0	0.20～0.50	—	—	≤0.10	≤0.05	—	≤0.05	≤0.005	—	≤0.01	≤0.01	≤0.30
	AZ63B	—	余量	5.3～6.7	2.5～3.5	0.15～0.60	—	—	≤0.08	≤0.003	—	≤0.01	≤0.001	—	—	—	≤0.30

续表 3.1-3

合金	牌号	对应ISO3116的数字牌号	化学成分/%													其他元素	
			Mg	Al	Zn	Mn	Ce	Zr	Si	Fe	Ca	Cu	Ni	Ti	Be	单个	总计
MgAlZn	AZ80A	—	余量	7.8~9.2	0.20~0.80	0.12~0.50	—	—	≤0.10	≤0.005	—	≤0.05	≤0.005	—	—	—	≤0.30
	AZ80M	—		7.8~9.2	0.20~0.80	0.15~0.40	—	—	≤0.10	≤0.05	—	≤0.05	≤0.005	—	≤0.01	≤0.01	≤0.30
	AZ80S	ISO-WD21170	余量	7.8~9.2	0.20~0.80	0.12~0.40	—	—	≤0.10	≤0.005	—	≤0.05	≤0.05	—	—	≤0.05	≤0.30
	AZ91D	—	余量	8.5~9.5	0.45~0.90	0.17~0.40	—	—	≤0.08	≤0.004	—	≤0.025	≤0.001	—	0.000 5~0.003	≤0.01	—
MgMn	M1C	—	余量	≤0.01	—	0.50~1.30	—	—	≤0.05	≤0.01	—	≤0.01	≤0.001	—	—	≤0.05	≤0.30
	M2M	—	余量	≤0.02	≤0.30	1.3~2.5	—	—	≤0.10	≤0.05	—	≤0.05	≤0.007	—	≤0.01	≤0.01	≤0.20
	M2S	ISO-WD43150	余量	—	—	1.2~2.0	—	—	≤0.10	—	—	≤0.05	≤0.01	—	—	≤0.05	≤0.30
MgZnZr	ZK61M	—	余量	≤0.05	5.0~6.0	≤0.10	—	0.30~0.9	≤0.05	≤0.05	—	≤0.05	≤0.005	—	≤0.01	≤0.01	≤0.30
	ZK61S	ISO-WD32260	余量	—	4.8~6.2	—	—	0.45~0.8	—	—	—	—	—	—	—	≤0.05	≤0.30
MgMnRE	ME20M	—	余量	≤0.02	≤0.03	1.3~2.2	0.15~0.35	—	≤0.10	≤0.05	—	≤0.05	≤0.007	—	≤0.01	≤0.01	≤0.30

表 3.1-4　中国变形镁合金新、旧牌号对照表

新牌号	旧牌号
M2M	MB1
AZ40M	MB2
AZ41M	MB3
AZ61M	MB5

续表 3.1-4

新牌号	旧牌号
AZ62M	MB6
AZ80M	MB7
ME20M	MB8
ZK61M	MB15
Mg99.50	Mg1
Mg99.00	Mg2

表 3.1-5　主要铸造镁合金锭标准相似牌号对照表

合金组别	中国 GB/T 19078	ISO 16220 的字母型牌号	ISO 16220、EN 1753 的数字型牌号	美国 ASTM	德国 DIN	英国 BS	法国 NF
MgAlZn	AZ81、AZ81S	MgAl8Zn1	MB21110	AZ81A	MgAl8Zn1	MAG1	G-A8Z
	AZ91D、AZ91S		MB21120、MB21121	AZ91D	MgAl9Zn1	MAG7	G-A9Z1
	AZ63A	—	—	AZ63A	—		—
MgAlMn	AM20S	MgAl2Mn	MB21210	—	—	—	—
	AM50A	MgAl5Mn	MB21220	AM50A	—	—	—
	AM60B	MgAl6Mn	MB21230	AM60B	—	—	—
	AM100A	—	—	AM100A			
MgAlSi	AS21S	MgAl2Si	MB21310	—	—		—
	AS41B、AS41S	MgAl4S1	MB21320	AS41B	MgAl4Si1	—	G-A4S1
MgZnCu	ZC63A	MgZn6Cu3Mn	MB32110	ZC63A	—	—	—
MgZnZr	K1A	—	—	K1A	—	—	—
	ZK51A	—	—	ZK51A	—	—	—
	ZK61A	—	—	ZK61A	—	—	—
MgZnREZr	ZE41A	MgZn4RE1Zr	MB35110	ZE41A	MgZn4SE1Zr1	MAG5	G-Z4TR
	EZ33A	MgRE3Zn2Zr	MB65120	EZ33A	MgSE3Zn2Zr1	MAG6	G-TR3Z2
MgREAgZr	QE22S、QE22A	MgAg2RE2Zr	MB65210	QE22A	MgAg3SE2Zr1	MAG12	G-Ag2.5
	EQ21S、EQ21A	MgRE2Ag1Zr	MB65220	EQ21A	—	MAG13	—
MgYREZr	WE54A	MgY5RE4Zr	MB95310	WE54A	—	MAG14	—
	WE43A	MgY4RE3Zr	MB95320	WE43A	—		—

表 3.1-6　主要变形镁合金锭标准相似牌号对照表

合金组别	中国 GB/T 5153	ISO 3116		美国 ASTM	日本 JIS
		字母型	数字型		
钝镁	Mg99.95、Mg99.50、Mg99.00	—	—	—	—

续表 3.1-6

合金组别	中国 GB/T 5153	ISO 3116		美国 ASTM	日本 JIS
		字母型	数字型		
MgAlZn	AZ31B AZ31S、AZ31T	MgAl3Zn1-A MgAl3Zn1-B	WD21150 WD21151	AZ31B、AZ31 AZ31D	MP1、MT1、MB1、 MS1
	AZ40M、AZ41M	—	—	—	—
	AZ61A、AZ61M、 AZ61S	MgAl6Zn1	WD21160	AZ61A	MT2、MB2、MS2
	AZ62M	—	—	—	—
	AZ63B	—	—	AZ63A	—
	AZ80A、AZ80M、 AZ80S	MgAl8Zn	WD21170	AZ80A	MB3、MS3
	AZ91D	—	—	AZ91D	—
	—	MgAl2Zn1	—	—	MP7
MgMn	M2M、M2S、M1C	MgMn2	WD42150	M1A、 M1C	—
MgZnZr	ZK61M、ZK61S	MgZn6Zr	WD32260	ZK60A	MB6、MS6
	—	MgZn3Zr	WD32250	—	MP5、MB5、MS5
	—	—	—	ZK40A	—
	—	MgZn1Zr	—	—	MB4、MP4、MS4
MgMnRE	ME20M	—	—	—	—
MgZnMn	—	MgZn2Mn1	WD32350	—	—
MgZnCu	—	MgZn7Cu1	WD32150	—	—
MgYREZr	—	MgY5RE4Zr	WD95350	—	—
	—	MgY5RE3r	WD95360	—	—

编写：黎文献（中南大学）
审稿：田荣璋（中南大学）

第 2 章　纯镁的特性及合金化

1　纯镁的特性

镁为Ⅱ A 族碱土金属，2 价，在室温的大气中呈银白色，晶体结构为密排六方（hcp），见图 3.2-1。多晶体的镁在低于 498 K 塑性变形时仅限于基面 $\{0001\}$ $\langle 11\bar{2}0\rangle$ 滑移及锥面 $\{10\bar{1}2\}$ $\langle 10\bar{1}1\rangle$ 孪生，因此其塑性比面心立方（fcc）结构的铝及体心立方（bcc）结构的铁差。镁的化学活性很强，极易与氧生成 MgO 薄膜，但 MgO 不致密，很难阻止金属进一步的氧化，而且镁的标准电位在金属结构材料中是最低的，因此极易造成材料的腐蚀。

镁及镁合金易于切削加工，其相对切削功：镁合金∶铝合金为 1∶1.8；镁合金∶铸铁为 1∶3.5；镁合金∶镍合金为 1∶10。

纯镁的主要物理和工程性能列于表 3.2-1。

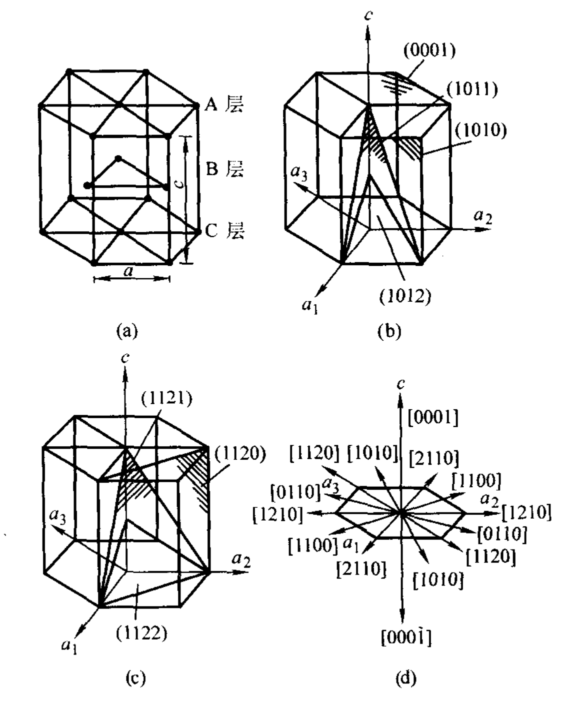


图 3.2-1　镁的晶体结构和滑移系

2　镁的合金化

2.1　镁的合金化一般规律

纯镁的工程应用很少，主要以多元合金形式应用。固溶强化和沉淀强化是镁合金常规的主要强化手段。许多元素对镁的合金化作用是显著的，凡是在镁中能大量固溶以及固溶度随温度变化有明显变化的元素都是镁合金的有效合金化元素。

表 3.2-1　纯镁的主要物理和工程性能

性　质	测量温度/℃	数　值
原子序数		12
相对原子质量		24.305 0
自然界的同位素		$79\%{}^{24}_{12}Mg$，$10\%{}^{25}_{12}Mg$，$11\%{}^{26}_{12}Mg$
密度	25	1.736 g/cm^3
熔点		(650 ± 0.5)℃
沸点		1 090℃
比热容 c_p	27	24.86 J/(mol·K)
	527	31.05 J/(mol·K)
摩尔熵	27	32.52 J/(mol·K)
	527	59.72 J/(mol·K)
摩尔焓 $H\text{-}H_{25℃}$	527	14.057 J/(mol·K)
线收缩率	650 ~ 20	1.9%
液固收缩率	650	4.2%
多晶体的线胀系数	27	$25.0\times10^{-6}/K^{-1}$
	527	$30.0\times10^{-6}/K^{-1}$

续表 3.2-1

性　质	测量温度/℃	数　值
热导率	27	156 W/（m·K）
	527	146 W/（m·K）
热扩散率	27	0.874 cm^2/s
多晶体电阻率	20	4.46×10^{-8} Ω·m
	600	17.0×10^{-8} Ω·m
多晶体镁的弹性模量	25	45 GPa
多晶体镁的泊松比	25	0.35
晶体结构	25	密排六方（hcp）
a		0.320 94 nm
c		0.521 07 nm
c/*a*		1.623 6
标准电极电位	25	−2.37 V

一些有工业意义的元素与镁形成二元合金时可以分为三类。

1）完全互溶类：Mg-Cd。

2）包晶反应类：Mg-In，Mg-Mn，Mg-Zr，Mg-Ti，Mg-Sc等，此类合金元素加入可以细化晶粒。

3）共晶反应类：Mg-Ag，Mg-Al，Mg-Zn，Mg-Li，Mg-Th，Mg-Sr，Mg-Ce，Mg-La，Mg-Nd，Mg-Y等，共晶反应型元素是主要强化元素。

合金元素对镁合金力学性能的影响大致也可以分为三类。

1）可同时提高合金强度与塑性的元素　按以提高强度为主的作用顺序：Al、Zn、Ca、Ag、Ce、Ga、Ni、Cu、Th等；按以提高塑性为主的作用顺序：Th、Ga、Zn、Ag、Ce、Ca、Al、Ni、Cu等。

2）主要提高塑性而对强度影响很小的元素　Cd、Tl、Li等。

3）提高强度而降低塑性的元素　Sn、Pb、Bi、Sb等。

最常见的镁的金属间化合物亦可分为三类。

1）AB型　简单立方，CsCl结构。如MgTi、MgAg和CeMg、SnMg等。可见，Mg可以具有正的或负的化合价。

2）AB_2型　Laves相，当原子半径之比 $R_A/R_B = 1.23$ 时，易于形成这种结构的相，如 $MgCu_2$、$MgZn_2$、$MgNi_2$ 等。

3）CaF_2型　这类化合物为面心立方金属间化合物，如 Mg_2Si、Mg_2Sn 等。

2.2 合金元素在镁中的固溶度

溶质原子固溶于基体金属中形成替代式固溶体或间隙式固溶体，可以产生固溶强化或在热处理过程中产生沉淀强化。在镁合金中，加入的溶质原子大多形成替代式固溶体，因此，了解合金元素在镁中的固溶度对合金设计和生产都是重要的。

根据Hume-Rothery固溶度准则，当形成替代式固溶体的溶剂原子的半径差超过15%时，原子的尺寸因素将不利于形成固溶体。通过比较镁的原子半径与合金元素原子半径的大小，有20余个合金元素可以满足上述要求。见图3.2-2。但Hume-Rothery准则还指出，除上述条件外，还与溶质和溶剂电负性相差的大小以及原子价有关，表3.2-2列出了一些合金元素在镁中的最大固溶度和形成的合金系。

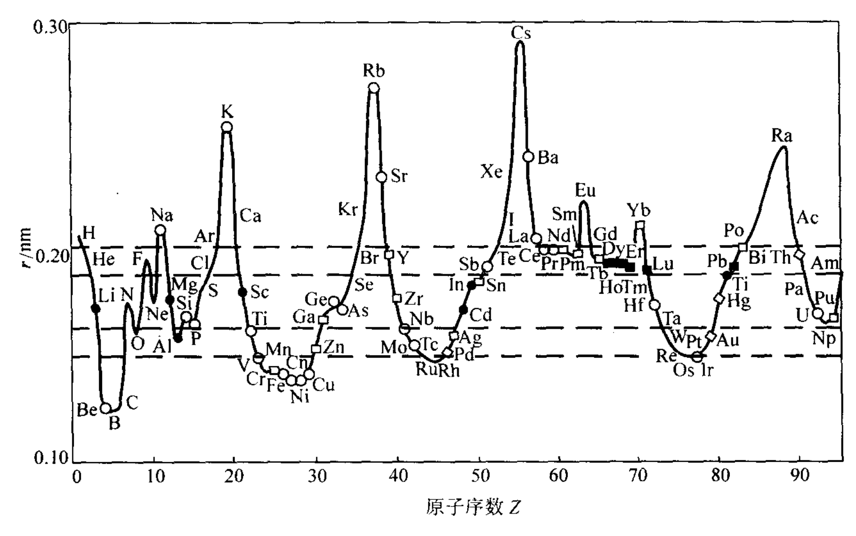


图 3.2-2　合金元素与镁原子半径比较

表 3.2-2 合金元素在镁中的最大固溶度和形成的合金系

合金元素	摩尔分数/%	质量分数/%	合金系	合金元素	摩尔分数/%	质量分数/%	合金系
Li	17.0	5.5	共晶	Sc	~15	~24.5	包晶
Al	11.6	12.7	共晶	Pb	7.75	41.9	共晶
Ag	3.8	15.0	共晶	Tn	6.3	31.8	共晶
Y	3.35	12.4	共晶	Tb	4.6	24.0	共晶
Zn	2.4	6.2	共晶	Su	3.35	14.5	共晶
Nd	~0.1	~0.6	共晶	Ga	3.1	8.4	共晶
Zr	1.0	3.8	包晶	Yb	1.2	8.0	共晶
Mn	1.0	2.2	包晶	Bi	1.1	8.6	共晶
Th	0.52	4.75	共晶	Ca	0.82	1.35	共晶
Ce	0.1	0.5	共晶	Sm	~1.0	~6.4	共晶
Cd	100	100	互溶	Au	0.1	0.8	共晶
In	19.4	53.2	包晶	Ti	0.1	0.2	包晶
Tl	15.4	60.5	共晶				

2.3 合金化元素的影响

主要的合金元素对镁合金的组织和性能的影响一般规律。

1）铝 铝是镁合金的主要合金化元素，Mg-Al 合金为镁合金的主要合金系，Mg-Al 二元相图见图 3.2-3。在平衡条件下铝在镁中的最大固溶度达 11.5%（质量分数），随着温度的下降固溶度有明显的降低，在 437℃时产生共晶反应 L→α + β（$Mg_{17}Al_{12}$），β（$Mg_{17}Al_{12}$）可溶入 α（Mg）中，在时效过程中从 α（Mg）中析出，Al 对 Mg 有固溶强化和时效强化作用，但时效强化效果不明显。

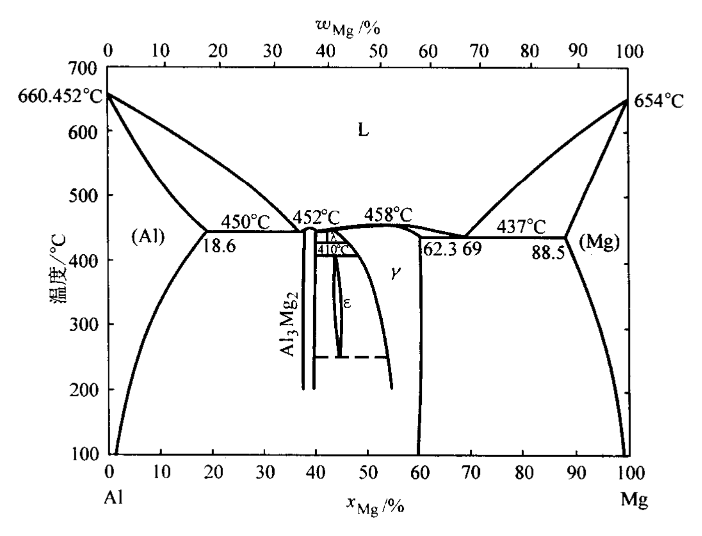


图 3.2-3 Mg-Al 合金二元相图

铝提高镁合金的抗拉强度、屈服强度和硬度，在 10%以内随着铝含量的增加强度和延伸率均逐渐提高，但含量过高时强度急剧下降，且 β（$Mg_{17}Al_{12}$）增多，在晶界上析出，降低合金抗蠕变性能和耐蚀性能，特别是会引起应力腐蚀。

铝能改善合金的铸造性能，大多数铸造镁合金铝含量较高，但也有较高的显微疏松倾向。

综合铝对多方面性能的影响，兼顾力学性能、铸造性能和耐蚀性能，一般 Mg-Al 合金中含铝量在 8%~9%为宜。

2）锌 锌是镁合金中一个重要的合金化元素，Mg-Zn 二元相图见图 3.2-4。从 Mg-Zn 相图富 Mg 角可见，Zn 在 Mg 中的最大固溶度为 6.2%，但随温度下降溶解度变化较小，在 341℃时产生共晶反应 L→α（Mg）+ MgZn。Mg 和 Zn 还可以形成一系列化合物。Zn 能改善合金的铸造性能，对 Mg 有一定的固溶强化作用，但没有沉淀强化效果。

Zn 一般都是和 Al 一起加入形成 Mg-Al-Zn 合金系，当 Mg-Al 合金中加入少量的 Zn 可显著提高 Al 在 Mg 中的固溶度，增大合金的固溶强化作用，并提高合金的耐蚀性能。但 Zn 含量过高时会显著增加合金凝固时的结晶温度间隔，因而产生热裂和疏松倾向，对耐蚀性能也有不良影响，因此在 Mg-Al 合金中一般 Zn 含量在 2.5%以下。

3）锰 锰在镁中的固溶度较小，最大平衡固溶度为 0.9%，在 650℃产生包晶反应。Mg-Mn 二元相图见图 3.2-5。含 Mn1.5%以上可提高镁合金抗拉强度，但易产生偏析和脆性相，降低合金的塑性和韧性。

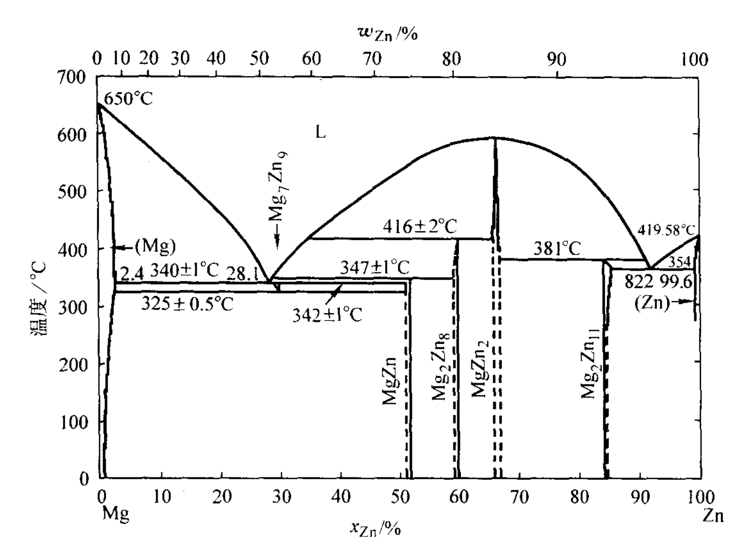


图 3.2-4 Mg-Zn 合金二元相图

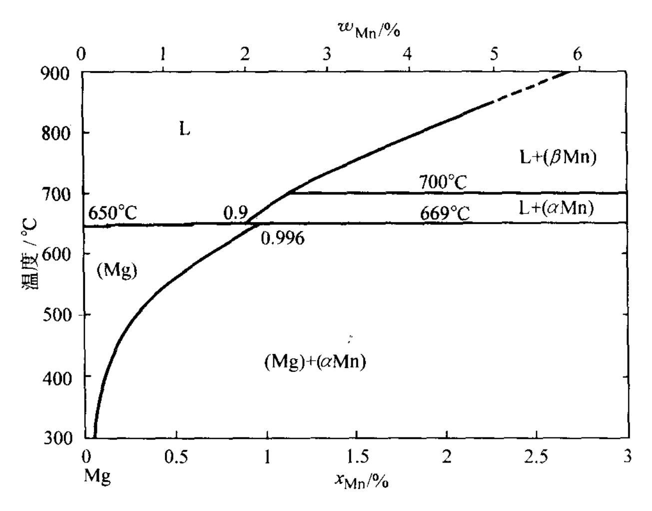


图 3.2-5 Mg-Mn 二元相图

锰加入镁中的主要作用是提高合金的耐蚀性能，因为 Fe 在 Mg 中是严重降低合金耐蚀性的有害元素，Mn 可与 Fe 形成高熔点化合物而从镁熔体中沉淀出来，减小 Fe 对镁合金耐蚀性能的危害，大多数情况下，只须加入微量（0.15% 左右）即可起到明显的作用。

Mn 还能细化晶粒，改善合金焊接性能。

4）银 Mg-Ag 二元相图见图 3.2-6，Ag 常和稀土元素一起加入形成 Mg-Ag-RE-Zr 合金。Ag 可提高镁合金的高温强度和蠕变抗力，并有良好的铸造性能和焊接性能，但可导致耐蚀性能的降低。

5）钍 Mg-Th 二元相图见图 3.2-7，钍是提高 Mg 合金高温强度和抗蠕变能力最有效的合金元素，同时还可以改善合金的铸造性能，抑制显微缩松和提高焊接性能。Mg-Th-Zr 系合金有很好的热处理强化效果，在航空工业得到了应用，但是，由于 Th 属放射性元素，限制了它的应用，现在 Th 基本上由稀土元素所取代。

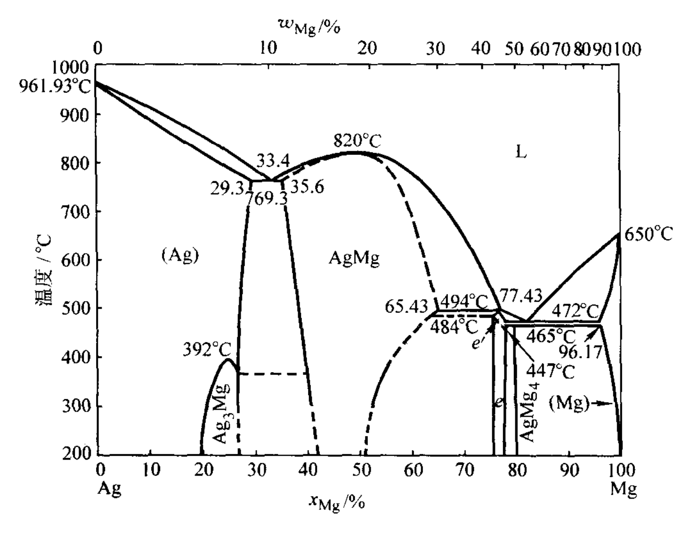


图 3.2-6 Mg-Ag 二元相图

6）锂 Mg-Li 二元相图见图 3.2-8，Li 在 Mg 中有很大的固溶度，在共晶成分范围形成（α+β）组织，当 Li 含量超过摩尔分数 30% 后可获得单相 β 组织，而 β 相为体心立方结构，也就是说此时的 β 合金晶体结构产生了改变，大大提高了 Mg 合金的塑性。Li 加入 Mg 中，可降低合金密度，提高塑性，产生固溶强化和时效强化，但使熔体的氧化和蒸发更为恶化，耐蚀性能严重降低，并产生应力腐蚀。

由于 Mg-Li 合金是目前最轻的合金，而且具有超塑性、

可焊，必将继续受到人们的重视。

7）锆 Mg-Zr 二元相图示于图3.2-9，在650℃时产生包晶反应，Zr 在液态 Mg 中的最大溶解度很小，摩尔分数约为0.1%，而在固态 Mg 中的固溶度较大，最大固溶度摩尔分数可达1%。

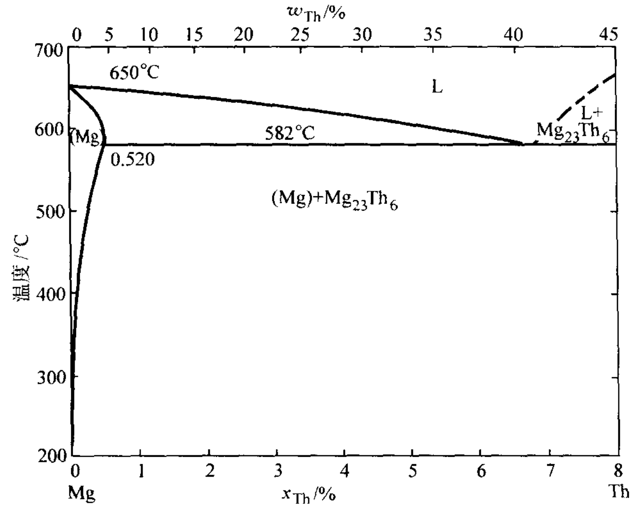


图 3.2-7 Mg-Th 二元相图

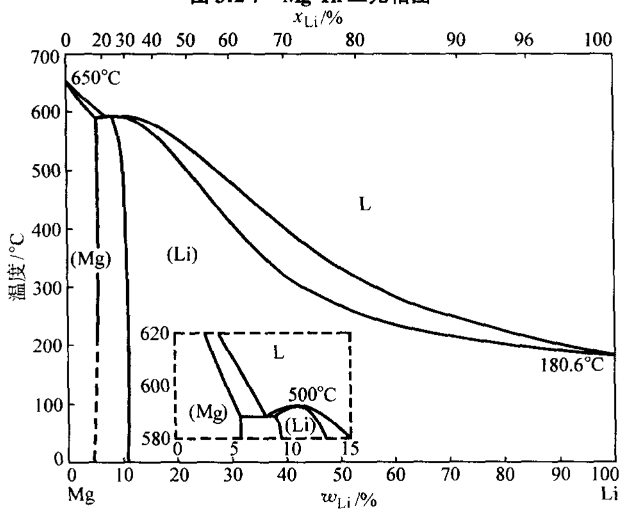


图 3.2-8 Mg-Li 二元相图

Zr 是 Mg 合金最有效的晶粒细化剂，加入0.2%～0.3% Zr 即能显著细化晶粒，改善铸件质量，消除显微缩松，明显改善合金塑性，稍微提高合金抗拉强度。Zr 还能与 Mg 熔体中的杂质 Fe 形成 Zr_2Fe_3 和 $ZrFe_2$ 化合物沉入坩埚底部而净化熔体，从而提高合金的耐蚀性能。但是，Zr 也与 Mg 合金中的合金化元素 Al、Mn 形成金属间化合物而下沉到坩埚底部，不仅不能使 Zr 发挥作用，也消耗了合金化元素，因此 Mg-Mn、Mg-Al 系合金不加 Zr，故有含 Zr 与不含 Zr 的 Mg 合金之分。

8）铍 镁合金熔体加入微量 Be（$<30\times10^{-6}$），由于改变了熔体表面氧化膜结构，使之致密，因而可显著降低熔体的氧化和起阻燃作用，但含量过高，会引起晶粒的粗化。

9）钙 钙可以细化镁合金的铸造组织，改善抗蠕变性能，对熔体的氧化有一定的抑制作用。在 Mg-Al-Ca 合金中所形成的金属间化合物（Mg，Al）$_2$Ca 有良好的热稳定性，并具有与 Mg 相似的六方晶体结构，可与 Mg 基体形成牢固的界面结合，具有钉扎作用，因而可提高合金蠕变抗力。在 Mg-Zn-Si 合金中加入微量 Ca 不仅可以细化晶粒，还可使 Mg_2Si 相由粗大的汉字型转变为细小弥散分布的颗粒，提高合金的室温和高温性能。

10）硅 弱的晶粒细化剂，可与许多合金元素形成稳定的硅化物以改善合金抗蠕变性能，在 Mg-Al 合金中添加1%以下的 Si 可改善合金的流动性，但 Si 可降低合金的耐蚀性能。

11）锶 弱的晶粒细化剂，在 Mg-Al 合金中加入 Sr 可提高合金的抗蠕变性能和耐盐雾腐蚀性能。

12）锑 可细化 Mg 合金铸造组织和细化 $Mg_{17}Al_{12}$，Mg_2Si 等强化相，形成 Mg_3Sb_2 相可提高合金强度和抗蠕变性能，以微量形式加入。

13）锡 当镁合金中含有少量铝时，加入适量锡可提高合金的塑性，减少热加工时的热裂倾向。

14）铁、镍、铜 有害杂质，严重降低镁合金的耐蚀性能，这些元素在镁中的固溶度都很小，所生成的化合物多分布在晶界上，且与基体合金有较大的电位差，给合金耐蚀性能造成极大的危害，必须加以严格控制。

15）稀土元素 稀土元素（包括 Y）是镁合金的重要合金化元素，各种稀土元素均与 Mg 形成有限固溶的共晶系，形成高熔点的金属间化合物，可以细化铸锭组织，产生固溶强化，沉淀强化，提高室温强度、高温强度、蠕变抗力，提高抗腐蚀性能，研究和应用较多的是 La、Ce、Nd、MM（混合稀土）和 Y。

研究表明：稀土细化镁合金的铸造组织的机理是使凝固前沿过冷度增大，对耐热性能的提高主要是高熔点金属间化合物对晶界的钉扎作用。

2.4 相图

重要的二元镁合金相图见图3.2-3～图3.2-13。

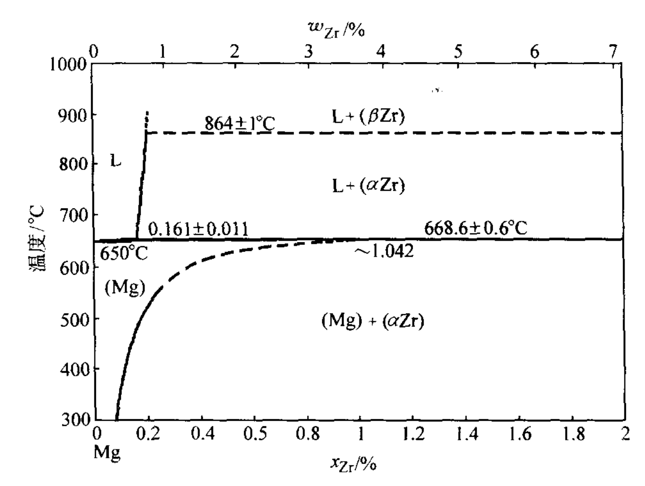


图 3.2-9 Mg-Zr 二元相图

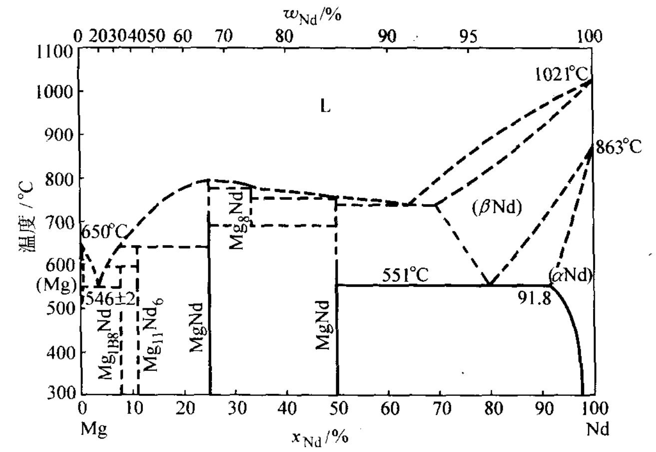


图 3.2-10 Mg-Nd 二元相图

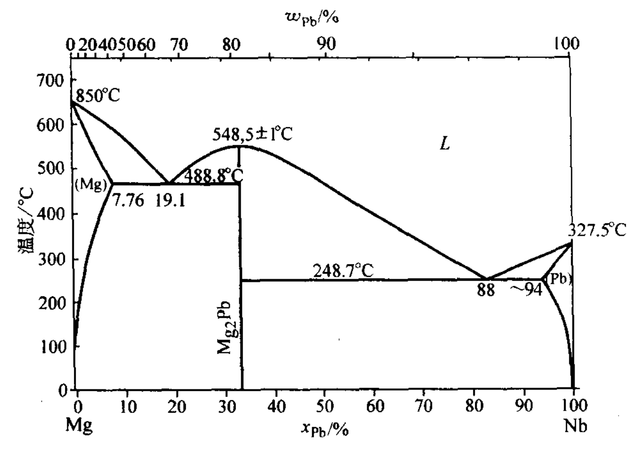


图 3.2-11　Mg-Pb 二元相图

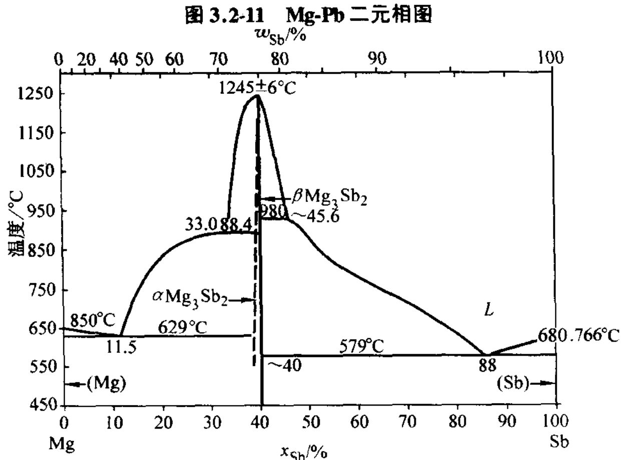


图 3.2-12　Mg-Sb 二元相图

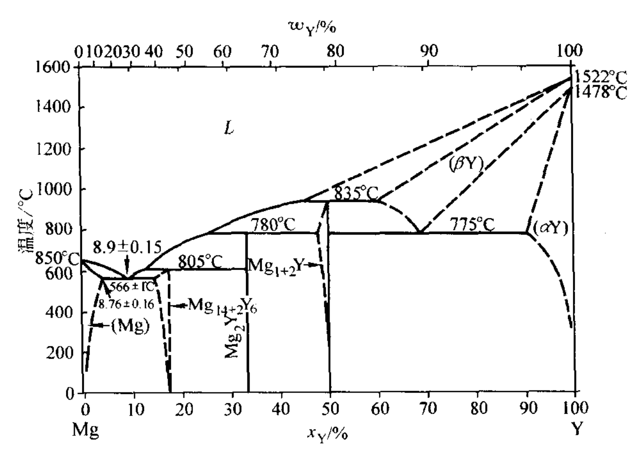


图 3.2-13　Mg-Y 二元相图

2.5　镁合金的热处理

镁合金和其他金属材料一样，可以通过热处理来改善其性能。镁合金常用的热处理方法有退火，固溶处理和时效等，其热处理状态的表示方法与铝合金相同。热处理的可能性决定于合金在固态加热和冷却过程中组织结构的变化。

镁合金在加热过程中铸造组织的均匀化以及变形组织的回复、再结晶规律与铝合金的相同。镁合金的固溶化及过饱和固溶体的分解是镁合金热处理强化的基础，过饱和固溶体的分解过程亦符合阶次规则，在析出平衡稳定相之前往往出现 GP 区或过渡相的过渡阶段，不同镁合金固溶体的分解有不同特点，比较复杂，很多问题有待进一步的研究。

主要镁合金系过饱和固溶体的分解过程见表 3.2-3。

表 3.2-3　镁合金中可能的沉淀过程

合金系	过饱和固溶体（SSSS）沉淀过程
Mg-Al	SSSS→在（0001）$_{Mg}$上形核的 $Mg_{17}Al_{12}$平衡沉淀物（非共格）
Mg-Cu	SSSS→GP 区（盘状，共格，// {0001}$_{Mg}$）→$MgZn_2$（杆状，共格，⊥ {0001}$_{Mg}$）→$MgZn_2$（盘状，半共格，// {0001}$_{Mg}$）→Mg_2Zn_3（非共格）
Mg-RE (Nd)	SSSS→GP 区（片状，共格，// {1010}$_{Mg}$）→$\beta''Mg_3Nd$（超点阵结构，共格）→$\beta'Mg_3Nd$（半共格）→$\beta Mg_{12}Nd$（非共格）
Mg-Y-Nd	SSSS→β'（DO_{19}超结构）→β' Mg12NdY? →$\beta Mg_{11}NdY_2$?（非共格）
Mg-Th	SSSS→$\beta''Mg_3Th$?（共格）→$\beta Mg_{23}Th_6$（非共格）
Mg-Ag-RE	SSSS→GP 区（杆状，共格）→γ→$Mg_{12}Nd_2Ag$（非共格）
(Nd)	SSSS→GP 区（椭球状，共格）→β→$Mg_{12}Nd_2Ag$（非共格）

编写：黎文献（中南大学）
审稿：田荣璋（中南大学）

第3章 铸造镁合金

镁合金按合金化组元数目可分为二元、三元和多元合金体系，常见的镁合金系一般都含有不止一种合金元素，但实际中为了简化和突出合金中主合金元素作用，可以把镁合金分为Mg-Mn、Mg-Al、Mg-Zn、Mg-RE（稀土）、Mg-Th、Mg-Ag和Mg-Li等合金系，显然，同一个镁合金系包括一系列牌号的镁合金。在这些合金系中又可根据合金中是否含有镁的晶粒细化元素锆，划分为两大主要镁合金系列，即不含锆的镁合金和含锆镁合金。前者主要以Mg-Al系合金为代表，后者则以Mg-Zn、Mg-RE（稀土）系合金为代表。常规的铸造镁合金化学成分见表3.3-1。压铸是生产铸造镁合金重要的铸造方法，专门用于压铸的铸造镁合金的化学成分见表3.3-2。

1 不含锆的铸造镁合金

典型的不含锆的铸造镁合金是Mg-Al系合金，同时该类合金也是目前种类最多、应用最广泛的镁合金系。它不但包括铸造镁合金，也包含了大量变形镁合金。Mg-Al系合金最早是在第一次世界大战期间由德国首先开发，以该系合金为基础，随后发展了大量的新型多元镁合金系列，包括Mg-Al-Zn、Mg-Al-Mn、Mg-Al-Si、Mg-Al-RE、Mg-Al-Ca等。在这些合金系列中，有一些合金的研究比较成熟，在工业上获得了稳定的应用，如Mg-Al-Zn、Mg-Al-Mn、Mg-Al-Si系列，其他一些合金则是在20世纪90年代以后研究和开发的，具有常规Mg-Al合金所不具备的一些新的性能特征。

1.1 Mg-Al系合金

1.1.1 Mg-Al系合金特性

Mg-Al系二元合金富镁的一侧是共晶型相图（见图3.2-3），在437℃时发生共晶反应：L→α（Mg）+β（$Mg_{17}Al_{12}$）。铝在镁中最大溶解度为12.7%（437℃），溶解度随温度降低而减少，室温下铝在镁中固溶度约为2%，铝含量超过该范围时，在富镁区可析出的第二相是β（$Mg_{17}Al_{12}$）相。

铸态下Mg-Al合金主要是由α（Mg）固溶体和枝晶间$Mg_{17}Al_{12}$相组成。在实际凝固条件下，Mg-Al合金，尤其是含铝量较高的镁合金，尽管铝含量低于极限固溶度12.7%，但也不是单相α（Mg），而是α+β（$Mg_{17}Al_{12}$）两相存在。这是因为在非平衡凝固条件下，Mg-Al合金中铝的最大固溶度只有5%~6.5%，由于液相中析出的α（Mg）中溶质Al来不及扩散均匀，富集在后凝固的液相中，造成凝固组织中两相共存。铸造时冷却速度越大，非平衡凝固偏离平衡态越远，此时α（Mg)和β（$Mg_{17}Al_{12}$）相的尺寸越小，铸态组织可更加细密。随着铝含量的增加，结晶温度间隔逐渐减小，凝固时α（Mg）+β（$Mg_{17}Al_{12}$）共晶体逐渐增多，使合金的铸造性能不断改善。在铝含量大于8%时，合金的铸造性能较好。

表3.3-1 典型的砂型铸造、金属型铸造和半连续铸造镁合金化学成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%									
	Al	Mn	Zn	Th	RE	Zr	Si_{max}	Cu_{max}	Ni_{max}	其他杂质
AM100A	9.3~10.7	0.10 min	0.30 max	—	—	—	0.30	0.10	0.01	0.30
AZ63Z	5.3~6.7	0.15 min	2.5~3.5	—	—	—	0.30	0.25	0.01	0.30
AZ81A	7.0~8.1	0.13 min	0.40~1.0	—	—	—	0.30	0.10	0.01	0.30
AZ91C	8.1~9.3	0.13 min	0.40~1.0	—	—	—	0.30	0.10	0.01	0.30
AZ92A	8.3~9.7	0.10 min	1.6~2.4	—	—	—	0.30	0.10	0.01	0.30
EZ33A	—	—	2.0~3.1	—	2.5~4.0	0.5~1.0	—	0.25	0.01	0.30
HK31A	—	—	0.30 max	2.5~4.0	—	0.4~1.0	—	0.10	0.01	0.30
HZ32A	—	—	1.7~2.5	2.5~4.0	0.10 max	0.5~1.0	—	0.10	0.01	0.30
AK1A	—	—	—	—	—	0.4~1.0	—	0.10	0.01	0.30
QE22A①	—	—	—	—	1.8~2.5②	0.4~1.0	—	—	0.01	0.30
QH21A	—	—	0.20 max	0.6~1.6	0.6~1.5	0.4~1.0	—	0.10	0.01	0.30
ZE41A	—	0.15 max	3.5~5.0	—	0.75~1.75	0.4~1.0	—	0.10	0.01	0.30
ZE63A	—	—	5.5~6.0	—	2.1~3.0	0.4~1.0	—	0.10	0.01	0.30
ZH62A	—	—	5.2~6.2	1.4~2.2	—	0.5~1.0	—	0.10	0.01	0.30
ZK51A	—	—	3.6~5.5	—	—	0.5~1.0	—	0.10	0.01	0.30
ZK61A	—	—	5.5~6.5	—	—	0.6~1.0	—	0.10	0.01	0.30

① Ag在QE22合金中含量为2.0%~3.0%。
② 稀土为富钕稀土。

表3.3-2 压铸镁合金化学成分 %

合金	Al	Zn	Si	Mn	RE	Cu	Fe	Ni	其他杂质	Mg
AM20	1.7~2.2	0.1 max	0.1 max	0.5 min	—	0.008 max	0.004 max	0.001 max	0.01 max	Bal.
AM50	4.5~6.3	0.1 max	0.1 max	0.27 min	—	0.008 max	0.004 max	0.001 max	0.01 max	Bal.
AM60B①	5.7~6.3	0.2 max	0.05 max	0.27 min	—	0.008 max	0.004 max	0.001 max	0.01 max	Bal.
AM60B②	5.5~6.5	0.22 max	0.1 max	0.25 min	—	0.010 max	0.005 max	0.002 max	0.02 max	Bal.
AS41A①	3.7~4.8	0.1 max	0.6~1.4	0.22~0.48	—	0.04 max		0.01 max	0.30 max	Bal.

续表 3.3-2

合金	Al	Zn	Si	Mn	RE	Cu	Fe	Ni	其他杂质	Mg
AS41A②	3.5~5.0	0.12 max	0.5~1.5	0.2~0.5	—	0.06 max	—	0.03 max	0.30 max	Bal.
AZ91D①	8.5~9.5	0.4~0.9	0.05 max	0.17 min	—	0.015 max	0.004 max	0.001 max	0.01 max	Bal.
AZ91D②	8.3~9.7	0.3~1.0	0.1 max	0.15 min	—	0.030 max	0.005 max	0.002 max	0.02 max	Bal.
AE42①	3.6~4.4	0.2 max	—	0.27 min	2.0~3.0	0.04 max	0.004 max	0.004 max	0.01 max	Bal.
AE42②	3.4~4.6	0.22 max	—	0.25 min	1.8~3.0	0.05 max	0.005 max	0.00 max	0.02 max	Bal.
ZC63	—	5.5~6.5	—	0.25~0.75	—	2.4~3.0	—	—	—	Bal.

①铸锭。②铸造材料。

Mg-Al 系合金的力学性能在铝含量低于极限固溶度时，随铝含量的增加而增加。T4 状态的合金强度（$\sigma_{0.2}$和 σ_b）和塑性较铸态下的要高。与铸态或低铝量的镁合金比较，含铝量高的 Mg-Al 合金力学性能也有明显提高。根据固溶强化原理，由于铝与镁原子半径相差较大（约 12%），而铝在镁中的固溶度随温度升高而增加，铝固溶愈多，固溶强化效应愈明显。铝原子在 α（Mg）中固溶和扩散主要通过空位进行，当含铝量大于 9%时，溶入 α（Mg）中的铝原子过多，大量消耗了空位，空位浓度降低到临界值以下，使扩散变得十分缓慢，含铝相 β（$Mg_{17}Al_{12}$）完全溶入 α（Mg）固溶体中所需的时间急剧增长，组织中残留的未溶解的脆性 β 相分布在基体晶界上，使力学性能急剧降低。因此，当铝含量过高时，合金力学性能又下降，所以一般铝含量控制在 9%以内。由于在时效过程中，β（$Mg_{17}Al_{12}$）相直接从 α（Mg）基体中析出，其时效沉淀强化效果不明显，只是屈服强度有所提高而伸长率降低，因此合金 T6 状态的力学性能与 T4 状态的相似。

Mg-Al 系合金铸造状态和热处理状态下力学性能与铝含量的关系曲线如图 3.3-1 所示。

β（$Mg_{17}Al_{12}$）相与 α（Mg）基体的电极电位相差较大，Mg-Al 合金中铝含量过高时，易引起应力腐蚀。因此，兼顾合金的力学性能和铸造性能，合金中铝最佳含量取 8%～9%最佳，这也是该铝含量的镁合金被最常使用的原因。实际生产中，由于 Mg-Al 合金有较大的结晶温度间隔，容易产生成分偏析，导致铸件厚壁处的后凝固的合金液中铝含量过高，同时厚壁处冷却缓慢而晶粒粗大，显著降低该部位的力学性能。为防止和减轻这种情况，对厚壁铸件常常控制较低的含铝量。

Mg-Al 系合金中还可以加入其他的一些元素构成多元系合金。Mg-Al-Zn 系合金不含稀贵元素，力学性能优良，流动性好，热裂倾向小，熔炼铸造工艺相对简单，成本较低，在工业上应用最早最普遍，成为镁合金应用领域最常用的合金系。但 Mg-Al 系合金屈服强度低，屈强比约为 0.33～0.43，铸件缩松严重，高温力学性能差，使用温度不能超过 120℃。因此该系合金主要在室温环境条件下应用。

Mg-Al-Zn 系合金中的锌在镁中溶解度较大，在 Mg-Zn 二元共晶温度 340℃时，Zn 的溶解度达 6.2%。当少量锌（约 1%）加入到 Mg-Al 合金中，可显著增加室温下铝在镁基体中的固溶度。锌由 2%提高到 4%，增大了合金的固溶强化作用。同时，锌的加入可大大提高合金的抗蚀性能和合金在 T4、T6 状态下的力学性能。但锌含量过高，却显著增大了合金的结晶温度间隔，增加了合金的热裂和缩松倾向。如 Mg-8% Al 合金中加入 2% Zn，不平衡结晶温度间隔增大 40～50℃，故 Mg-Al 合金中 Zn 含量一般控制在 1%左右。Mg-Al-Zn 合金铸造性能与成分之间的关系见图 3.3-2，可见含有 10%以内的铝和 2%以内的锌的镁合金有比较好的铸造性能。当锌含量提高到 5%～12%范围时，铸造性能变差并容易出现热裂。而当锌含量继续提高，会再次出现一个可铸造区，但该区的合金成分范围受铝含量的影响。

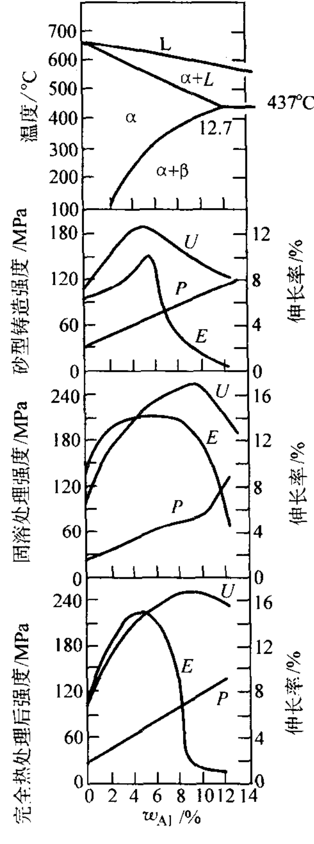


图 3.3-1 Mg-Al 合金中铝含量与力学性能之间的关系曲线
P—屈服强度；U—抗拉强度；E—伸长率

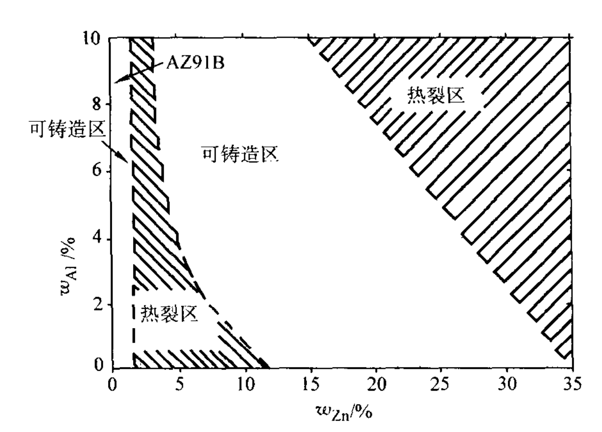


图 3.3-2 Mg-Al-Zn 合金铸造性能与成分之间的关系

Mg-Al 合金中加入少量锰可明显提高耐蚀性能。这是因为锰在镁液中易与铁形成高熔点的 Mg-Fe 化合物而从镁液中沉淀，减少了杂质铁对合金耐腐蚀性能的危害。而且锰溶人 α (Mg) 中可提高基体的电位，使镁基体耐蚀性提高。锰还对细化 Mg-Al 合金晶粒有利。但锰含量不宜过高，否则引起锰的偏析而形成脆性相，对合金塑性、冲击韧度有不利影响，通常锰含量控制在 0.5%以下。

Mg-Al 合金中常加入元素铍。铍对镁呈表面活性，镁液中加微量铍可以形成致密的氧化物 BeO 填充疏松的 MgO 膜，阻滞镁合金液继续氧化，是镁合金中一种有效阻燃元素。但铍含量过多会引起晶粒粗化，恶化合金力学性能，增加合金热裂倾向，一般的镁合金铸件中铍含量应控制在 100×10^{-6} 以下。

Mg-Al 系合金中需要严格控制的主要杂质元素包括 Cu、Fe、Ni、Co、Si 等，这些元素严重降低合金的抗蚀性。因为它们在镁中的固溶度很小，很低的含量就足以在晶界上形成与基体有很大电位差的难溶相，产生腐蚀。因为熔炼铸造工具的影响，Si 和 Fe 最容易在熔铸过程中带入，而且铁在镁中还有一定的溶解度，很难去除这些有害杂质，目前主要通过在镁中加入一定量的锰来去除铁等杂质。

AZ91（8.5% ~ 9.5% Al，0.45% ~ 0.9% Zn，0.15% ~ 0.2%Mn，≤0.002%Be）合金是 Mg-Al-Zn 系中目前应用最广泛，力学、耐蚀、工艺等综合性能优良的一种典型铸造镁合金。该合金铸态组织为 α (Mg) 基体晶界上分布呈不连续网状的 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相，部分 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相在枝晶间呈粒状和短条状。铸态下 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相有两种形式，一种呈多边形块状，是凝固过程中形成 α + β 离异共晶的初次 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相。另一种是围绕在初次 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相周围的灰黑色片层状二次 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相。在 α (Mg) 晶内有 MnAl 相小质点。

AZ91 合金经过固溶处理后，β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相一般固溶到基体中，但较粗大的块状初次 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相不会全部溶解而残留晶界上，MnAl 相则仍在基体中。

该合金经时效处理后，β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相可以重新从饱和的 α (Mg) 固溶体中析出，析出的 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相细小弥散，在一般光学显微镜下不易观察。析出的 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相有两种形态。一种为从晶界向晶内以类似珠光体形式的层片状 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相，它是由过饱和的 α (Mg) 基体转变为接近平衡成分的片状 α (Mg) 相和新的片状 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相重叠分布的两相组织，即 $\alpha_{SSS} \rightarrow \alpha + \beta$。当 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相一形成，两层间的 α (Mg) 固溶体立即由过饱和状态转变为近平衡成分，并与原始成分的 α_{SSS} 形成界面，界面两边固溶体的成分及晶格位向发生突变，合金按"不连续析出"形式析出。这时 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相的成长只依靠界面附近的原子扩散，而非远距离的扩散。β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相的不连续析出往往由局部晶界等处开始，然后向晶内逐步伸展，故多为不均匀的局部析出。

另外一种 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相的析出是在基体中以细小的 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相质点弥散析出，通常情况下，β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相先以层片状析出，到一定程度后再以弥散形态析出。弥散的 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相一形成，在其附近固溶体中铝的浓度降低，在固溶体内不产生新的界面，形成"连续析出"。连续析出可以是遍布基体的普遍析出，也可以是局部析出。很明显，普遍析出的细小弥散的 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相强化效果比局部析出的片状 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相高。

合金的成分和时效规范不同时，β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相的连续和不连续析出行为会不同，尤其是时效温度会有较大的影响。图 3.3-3 说明了合金成分和时效温度对 Mg-Al 合金中 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相析出行为的影响。在时效温度 T 小于 T_{c1} 时，β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相主要以细小弥散状连续析出。当 $T_{c1} < T < T_{d1}$，连续析出和不连续析出都会发生，随着温度的升高，不连续析出所占比例增加。当 $T_{d1} < T < T_{d2}$，只有 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相的不连续析出。随温度升高 $T_{d2} < T < T_{c2}$，又出现 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相的连续和不连续析出，层片状 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相片层间距增加，弥散析出的 β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相质点尺寸变大，并且温度升高，不连续析出所占比例减少。当温度继续升高到固溶温度 T_S 时，β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相全部为连续析出。

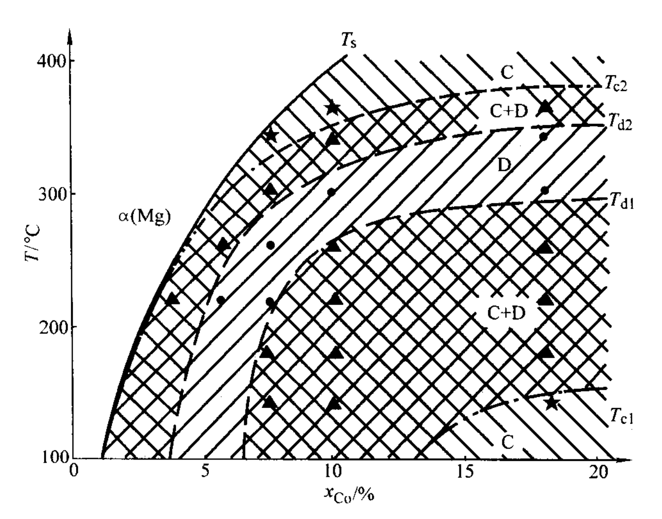


图 3.3-3　β ($Mg_{17}Al_{12}$) 相在 Mg-Al 合金中析出形式与合金成分、温度的关系

C 表示连续析出；D 表示不连续析出

AZ91 合金可以应用在 F、T4、T6 等多种热处理状态下。T4 状态可用作承受冲击载荷的零件，合金 T6 状态抗拉强度和塑性好，甚至超过了铝合金 ZL104T6 状态的相应性能，可用作承受较大动静载荷的零件。

针对 AZ91 合金成分和组织的改进，近年来研究重点放在合金成分的纯净化和均质化方面。如开发出了 AZ91D、AZ91E、AZ91F 等一系列牌号的合金。其中高纯的 AZ91HP 合金的耐蚀性能获得很大的提高。该合金压铸的整体力学性能获得提高，组织更细小，减少了铸造缺陷，并可以加入微量其他合金化元素调整性能，使 AZ91 合金得到了很大的发展。

在 Mg-Al 系合金中加入 Si 是 20 世纪 70 年代研发的新型商用镁合金，主要是用于压铸镁合金，包括 AS41（Mg-4.3% Al-1% Si-0.35% Mn）和 AS21 合金（Mg-1.7% Al-1.1% Si-0.4% Mn）。Mg-Al-Si 合金中主要的第二相 Mg_2Si 相有高的熔点（1 085℃）、高的硬度（460HV）、低的密度（1.9 g/cm³）和低的线胀系数（$7.5 \times 10^{-6}\,K^{-1}$）。这类合金主要具有在 150℃ 下良好的高温抗蠕变性能，在 175℃ 下其抗蠕变能力超过常用的 AZ91 和 AM60 合金。AS41 合金具有较高的室温屈服强度、抗拉强度，同时有良好的塑性。AS21 合金的抗蠕变性能优于 AS41 合金，但其室温力学性能较差，耐蚀性较低且铸造性能不如 AS41 合金。最近，在 AS21 合金中添加（0.05 ~ 0.35）% Mn 和 0.15% RE 制备的 AS21 合金，可以在耐热性不降低的同时提高合金耐蚀性能，使其耐腐蚀性能可与 AZ91D 合金相当。

Mg-Al-Si 系合金中强化相 Mg_2Si 只有在较快的冷却速度下才能细小弥散分布，在普通砂模铸造等缓冷条件下，Mg_2Si 相粗大并具有"中国字"形貌，这种粗大相脆且硬，对合金性能有很坏的影响。因此这类合金多采用压铸方式进行制备。

最近研究发现，通过在合金中添加 Ca 对 Mg_2Si 相有很好的变质作用，使其细化并改变其“中国字”形貌，从而使该合金的所有力学性能获得进一步的提高，而且可以使用所有的铸造工艺生产。普通商用 Mg-Al-Si 系合金具有比 Mg-Al-Zn 合金更好的高温性能，可以在汽车发动机匣等较高温度下工作的零部件上使用，使镁合金的应用范围扩展，是很有发展前途的一类合金。

稀土在镁合金中的作用最早在20世纪30年代就被认识，并且在此基础上专门发展了 Mg-RE 类合金。但在铸造 Mg-Al 系合金中添加稀土是在20世纪70年代 Foerster 公司首先报道的 Mg-Al-MM（富 Ce 混合稀土）合金。该合金中加入了1%的混合稀土可明显提高合金的抗蠕变性能，其抗蠕变性能超过 Mg-Al-Si 合金。Mg-Al-RE 合金中主要第二相有 Al_4RE 相和 β（$Mg_{17}Al_{12}$）相，其中 Al_4RE 相熔点达到 1 200℃，耐热性很高，是主要的强化相。典型的 Mg-Al-RE 类合金是 AE41（Mg-4% Al-1% RE）和 AE42（Mg-4% Al-2% RE）合金，其中稀土元素可以是 Ce、Nd、La 或其混合稀土。但这类合金由于添加稀土而比较贵，并且压铸性不如其他合金系好，因此其应用受到一定的限制，但也是 Mg-Al 系合金很重要的合金化发展方向。

在 Mg-Al-RE 类合金中添加0.25%～5.5%的钙，可以降低 Mg-Al-RE 系合金的成本并同时提高合金的高温性能，特别是抗蠕变性能可以超过 AE42 合金。典型的这类新型合金是 ACM522（Mg-5%Al-2%Ca-2%RE）合金，该合金具有良好的室温和高温综合性能、耐蚀性能和抗蠕变性能，可以在高温（150℃）和高应力（50～85 MPa）的载荷条件下长时间工作，综合性能超过了铸造铝合金 A384，已经使用在轿车的齿轮箱壳体等相关零部件上。

Mg-Al-Ca 合金是最新研发的一类 Mg-Al 系合金，钙提高镁合金的抗蠕变性是在20世纪60年代英国专利首先报道。Ca 在 Mg 中最大固溶度为2.2%，在含铝3%～9%的镁合金中加入 Ca 可出现 Al_2Ca 相，如果 Ca 和 Al 的比超过0.8，则出现 Mg_2Ca 相。Al_2Ca 相熔点为 1 079℃，Mg_2Ca 相熔点为715℃，这两种相都具有良好的强化效果并具有很好的高温稳定性，可以有效地提高合金高温强度和抗蠕变能力，当铝原子进入到 Mg_2Ca 相晶格中时，该合金中还会出现另一热稳定相 $(Mg, Al)_2Ca$ 相，这种相在晶界附近析出，可以有效地钉扎晶界，阻止其滑动，因此 Ca 成为新型的耐热镁合金的一种重要添加元素。

对于 Mg-Al-Ca 合金中 Ca 的作用有两点非常重要。第一，当钙在镁中含量约为1%时，Mg-Al-Ca 合金的冷隔、热裂和粘模等铸造缺陷十分严重，而当钙含量超过2%后，这些合金在铸造时容易出现的缺陷会大幅度减少；第二，在含钙的镁合金中加入0.1%的锶，可以进一步提高合金的抗蠕变性能和耐蚀性能。此外，Mg-Al-Ca 合金有很好的压铸成形性能，可以制造压铸的薄壁件。因此，Mg-Al-Ca 合金成为 Mg-Al 系合金新的发展方向，典型的该类合金有 AX51（Mg-5%Al-0.8%Ca）合金、AX33（Mg-3%Al-3%Ca-0.6%Mn）合金、AXJ521（Mg-5%Al-2%Ca-1.2%Sr）合金等。

以上典型 Mg-Al 系铸造合金的物理性能见表3.3-3。与铸造铝合金及铸造锌合金比较，镁合金的密度及单位体积熔化能非常低，例如，将 AZ91 合金由室温加热到高于熔化温度50℃所需要的能量为 ADC（Al-12SiCuFe）铝合金的77%，这是铸造镁合金的优点。

普通砂型、永久型铸造镁合金的室温力学性能见表3.3-4。压铸 Mg-Al 合金典型室温性能见表3.3-5。这些性能值是在标准的铸造条件下测量的，实际铸造的镁合金材料的力学性能值与这些值可以有差别。对比可知，压铸方法生产的镁合金力学性能较高，因此压铸是生产铸造镁合金非常重要的一类铸造方法。

压铸的镁合金轻质、高比强、高阻尼和易切削，采用该方法生产的大多数镁合金是 Mg-Al 系合金。这是因为含铝的镁合金强化效果好，并具有很好的压铸性能。目前，70%以上的工业用镁合金铸件是通过压铸方法制造的 Mg-Al 系合金。

表3.3-3 铸造 Mg-Al 系合金的物理性能

物理性能	AZ91B	AM100A	AM60A	AS41A
凝固范围/K	470～595	440～600	540～615	570～620
比热容/kJ·(kg·K)$^{-1}$	0.98	1.05	1.05	1.01
线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$				
20～100 K	26.8	26.1	25.6	26.1
20～200 K	28.1	27.3	—	—
20～300 K	28.7	27.7	—	—
热导率/W·(m·K)$^{-1}$	78.5	78.5	61	68
20℃密度/g·cm^{-3}	1.81	1.81	1.79	1.77
电阻率/nΩ·m	150	150	—	—

表3.3-4 砂模铸造 Mg-Al 系合金室温力学性能

合金牌号	热处理状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
AM100A	T6	241	117	1
AZ63	F	179	76	4
	T4	234	76	7
	T5	179	83	2
	T6	234	110	3
AZ81	T4	234	76	7
AZ91C	F	158	76	1
	T4	234	76	7
	T5	158	83	2
	T6	234	110	3
AZ92A	F	158	76	1
	T4	234	76	6
	T5	158	83	1
	T6	234	124	1

表3.3-5 压铸 Mg-Al 系合金室温力学性能

性能	AM20	AM50	AM60	AS41	AZ91
抗拉强度/MPa	160～210	180～220	190～230	190～230	196～255
屈服强度/MPa	90～120	110～140	120～150	120～150	147～167
伸长率/%	8～12	5～9	4～8	3～6	0.5～3
布氏硬度 HB	40～55	50～65	55～70	60～90	65～68
弹性模量/GPa	—	—	43	—	44
疲劳强度 (5×10^7) /MPa	—	—	49～69	49～69	49～69

压铸镁合金中 AZ91 合金中添加锌是以牺牲伸长率为代价来提高合金室温强度的。AM 系列合金基本不含锌，是以牺牲强度和硬度为代价来提高伸长率的，最近研究表明，

AM20 合金最高伸长率可达到 20%。

铸造 Mg-Al 合金高温拉伸性能见表 3.3-6。高温加热持续时间对 AZ91 合金高温拉伸性能的影响见表 3.3-7。高温持久和蠕变强度极限见表 3.3-8。对比几种 Mg-Al 系合金高温力学性能可知，AZ91 合金的热稳定性不高，温度高于 120℃ 时，其抗拉强度降低（图 3.3-4）。而对比合金的蠕变性能可知（图 3.3-5），AS 类合金是可以应用在 120℃ 以上温度的耐热镁合金，并被 ASTM 标准认可。一些新型的镁合金，如 AX33（Mg-3% Al-3% Ca-0.6% Mn）具有良好的高温力学性能和抗蠕变性能。

表 3.3-6 镁铝系 AZ91 合金的高温拉伸性能

合金	铸造方法及热处理状态	试验温度 /℃	抗拉强度 σ_b	屈服强度 $\sigma_{0.2}$	伸长率 δ_{10} /%
			MPa		
AZ91	F，T4	100	226	78	10
		125	216	—	12
		150	181	59	12
		175	157	—	15
		200	152	49	15
		250	118	39	15
	F，T6	100	226	—	6
		125	216	—	8
		150	181	—	10
		175	157	—	12
		200	152	—	15
		250	118	—	15

表 3.3-7 加热持续时间对 AZ91D 合金高温拉伸性能的影响

加热时间/h	试验温度/℃					
	150		200		300	
	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ_5/%	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_5 /%	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ_5/%
0.5	201	19	172	19	83	20.5
30	196	17	167	16.5	83	17
50	206	20	167	14	88	18.5
100	206	21	177	15	83	17
200	206	18.5	186	16	83	17.5

表 3.3-8 Mg-Al 系合金的高温持久与蠕变强度极限

合金	热处理状态	试验温度/℃	持久强度极限 σ_{100} /MPa	蠕变强度极限 $\sigma_{0.2/100}$/MPa	
				总变形	残余变形
AZ91	T4	100	—	46	69
		125	—	41	59
		150	83	21	25
		175	—	—	—
		200	49	—	8
		250	25	—	—
	T6	100	—	—	73
		125	—	—	—
		150	—	—	26
		175	—	—	—
		200	—	—	11

Mg-Al 合金疲劳强度极限见表 3.3-9。Mg-Al 合金的弹性性能见表 3.3-10。Mg-Al 系合金的铸造性能见表 3.3-11。

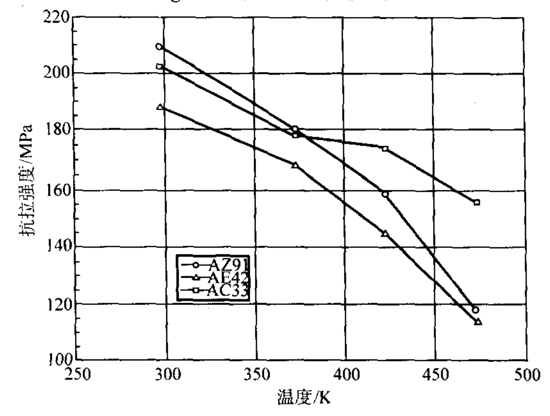


图 3.3-4 Mg-Al 合金高温强度比较

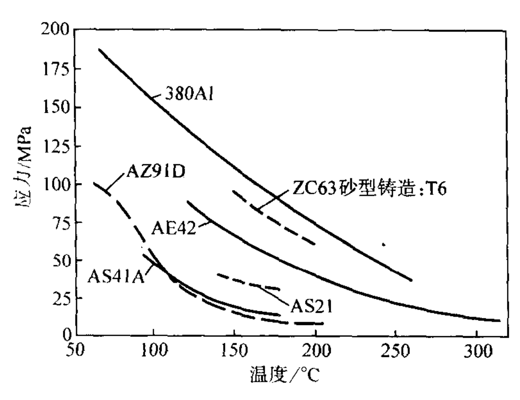


图 3.3-5 Mg-Al 合金蠕变性能比较

1.1.2 Mg-Al 系合金的主要用途

Mg-Al 系合金已广泛应用在航天航空领域的发动机及其附件等结构件和一些普通用途的零部件上。在民用方面，铸造 Mg-Al 合金作为轻质高比强度的金属材料，在汽车的减重和性能改善中起重要作用，可以大量用于汽车零件上。采用的镁合金零部件有轮毂、仪表盘、座椅框架、变速箱壳体、转向系统、汽缸盖和刹车踏板架等，正在开发应用的有门框、大的车体外部构件、支撑柱、发动机箱体、底盘等。其中，安装安全气囊的汽车都开始改用镁合金方向盘，可以降低震动，在发生意外撞击时，镁合金可吸收更多的能量，保证驾驶员的安全。对于镁在汽车上的应用，国际镁协会已经提出"全镁概念车"。

随着镁合金的应用成本的下降，Mg-Al 合金在计算机、通讯、仪器仪表、家电、医疗、轻工等行业的应用发展迅速。在电子信息和仪器仪表行业，由于对电子及通讯产品的高度的集成化、轻薄化、微型化和符合环保的要求越来越高，Mg-Al 合金具有优异的薄壁铸造性能，其压铸件的壁厚可为 1～1.5 mm，并保持一定的强度和刚度，这非常有利于电子及通信产品超薄、超轻和微型化的要求。此外，镁合金外壳兼具电磁屏蔽、散热和环保特性，这是工程塑料，甚至铝合金所无法达到的。目前已开发上市的典型产品有便携式电脑外壳和键盘底盘、手机外壳、数码相机机身、摄录像器材壳体、LCD 上下盖板等。采用 Mg-Al 合金压铸件，满足了外壳材料减重和内部复杂结构的要求。

Mg-Al 系合金可以制造手动工具，如电钻、伐木锯、剪草机、电锯等的壳体和零件。Mg-Al 合金可以用于日用品、办公用品、体育用品等物件的制造上。此外，Mg-Al 系合金还能制造保护在海水中使用（如船舶）和埋藏在土壤中的设

表 3.3-9 Mg-Al 系合金的疲劳强度极限

合金	热处理状态	试验温度 /℃	疲劳极限（光滑）σ_{-1}	疲劳极限（缺口）① σ_{-1H}	疲劳寿命 N
			MPa		周
AZ91C	F	20	83	69	5×10^7
	T4	20	98	78	
		150	39	25	
	T6	20	83	69	
AM100A	F	20	83	69	5×10^7
	T4		93	74	
	T6		83	69	
AZ91B	F	20	97	—	5×10^8
AM60A			59	—	1×10^8
AS41A			59	—	

① 缺口半径为 0.75 mm。

施（如石油管道）等金属结构件的牺牲阳极，可以得到满意的保护效果。

表 3.3-10 Mg-Al 系合金的弹性性能

合金	热处理状态	弹性模量 E	切变模量 G	泊松比 ν
		GPa		
AZ91	F	45	17	0.35
	T2	45	17	0.35
	T4	45	17	0.35
	T6	45	17	0.35
AM100A	F	45	17	0.35
	T4	45	17	0.35
	T6	45	17	0.35
AZ91B	F	45	17	0.35
AM60A	F	45	—	0.35
AS41A	F	45	—	0.35

表 3.3-11 Mg-Al 系合金的铸造性能

合金	铸造温度 /℃	流动性棒长 /mm	热裂倾向环宽 /mm	线收缩率 /%
AZ91C	690 ~ 800	290	30 ~ 35	1.2 ~ 1.3
AM100A	690 ~ 800	335	25 ~ 30	1.1 ~ 1.2

1.2 Mg-Zn-Cu 系合金

不含锆的镁合金系列还包括 Mg-Zn-Cu 系合金，该系合金是在 Mg-Zn 系合金基础上发展而来的。因为 Mg-Zn 二元合金晶粒粗大而很少能单独作为铸造或变形合金使用，研究发现，在 Mg-Zn 合金中加入 Cu，可以显著地增加合金的塑性和时效硬化效果。典型的 Mg-Zn-Cu 系合金是牌号为 ZC63（Mg-6%Zn-3%Cu）的合金，在该合金中铜含量较高，可以显著提高合金系的共晶温度，这样可以使合金在较高的温度下使用，并且可以在更高的固溶温度下进行热处理，使 Cu 和 Zn 充分固溶到 α（Mg）基体中而提高合金的强度。时效后合金中析出棒状的共格 β_1 和片状的半共格 β_2 两种形貌的过渡相，可以提高合金时效硬化效果。ZC63 合金结晶温度区间在 465 ~ 635℃，室温屈服强度为 125 MPa，抗拉强度为 210 MPa，伸长率为 4%，布氏硬度为 55 ~ 65HBS，力学性能超过 Mg-Al 系 AZ91C 合金。而且，高温下 ZC63 合金有很好的热稳定性，在 150℃下保温 100 h 力学性能几乎不降低。虽然 Cu 加入到合金系中对镁合金的腐蚀性能有不利的影响，但对于 ZC63 合金而言，Cu 的这种降低耐蚀性的影响并不严重，主要是因为在这个合金中，Cu 在合金中形成的共晶化合物 Mg（Cu，Zn)$_2$ 对镁基体的影响减小。为进一步提高合金力学性能和降低腐蚀，还开发出可以时效强化的四元 Mg-Zn-Cu-Mn 的 ZC71 合金。该系合金主要应用在高温零部件上，但还是要注意它们在使用条件下的腐蚀情况。

2 含锆的镁合金

锆对镁有很好的晶粒细化作用，早在 20 世纪 30 年代即被发现。采用添加锆的方法来细化晶粒的镁合金，称为含锆镁合金。锆的晶体结构与镁相同，为密排六方晶型，晶格常数接近，Mg：a = 0.320 nm、c = 0.520 nm；Zr：a = 0.323 nm、c = 0.514 nm。锆满足作为异质形核的“尺寸结构匹配”原则，因此锆可以成为 α（Mg）的结晶核心。

根据 Mg-Zr 相图（图 3.2-9），Mg-Zr 系为包晶反应，锆在镁中的溶解度为 0.6%，因此在 Mg-Zr 合金中，锆多以单质 Zr 形式存在，而且容易聚集造成成分偏析并容易在熔化过程中沉淀。

由于 Zr 会和 Al、Mn 等元素形成 Al_3Zr 等固态高熔点化合物下沉，造成锆的损失，丧失对镁合金基体的细化效果，因此对于 Mg-Mn、Mg-Al 系合金，不能使用 Zr 作为晶粒细化剂。而以锌、稀土等其他元素作为主合金元素的 Mg-Zn、Mg-RE 合金系，成为典型的含锆的镁合金系列。

此外，锆在镁合金中非常容易和杂质 Fe、Si 等形成高熔点固态化合物而下沉，从而造成锆的大量损失而不能溶解到镁液中去，因此在含锆的镁合金中要严格控制这些元素的存在。在锆加入到镁合金中时，既要保证“溶解锆”的量，也要保证“单质锆”的含量（“溶解锆”主要作为晶粒细化剂起作用，“单质锆”用来确保“溶解锆”的含量并除［H］、Fe 等杂质），故在合金生产制备中应特别重视控制溶解锆的量，保证锆对合金晶粒细化的效果。

与不含锆的 Mg-Al 系合金比较，含锆镁合金的共同特点是强度更高，特别是屈服强度值较高，屈服强度与抗拉强度比值高，还可以加入稀土、银等其他多种合金元素提高合金的耐热性能，成为具有优良抗蠕变性能和持久高温强度的耐

热镁合金。因此，含锆镁合金又常常被分为高强镁合金和耐热镁合金两大类，其具有代表性的合金系列分别为 Mg-Zn-Zr 合金和 Mg-RE-Zr 合金。在此基础上又开发出 Mg-Ag-Zr、Mg-Th-Zr 等合金，用在航空航天等需要高性能镁合金材料的领域，应用和发展前景十分广阔。典型的一些含锆镁合金化学成分可见表 3.3-1。

2.1 Mg-Zn-Zr 系合金

Mg-Zn 系二元合金铸造性能很差，常常添加锆以细化晶粒，但合金中锌仍是主要合金组元。根据 Mg-Zn 二元相图（图 3.2-4），共晶点成分为 51.2%的锌。在 340℃发生共晶反应：L→α (Mg) +β (Mg_7Zn_3)，温度下降至 312℃时发生共析反应：β (Mg_7Zn_3) →α (Mg) +γ (MgZn)。锌在镁中的最大固溶度为 6.2%，温度下降固溶度逐渐减小，因此合金具有热处理强化的潜力，其强化相为γ (MgZn)。合金中随锌含量的增加，强化作用增加，当锌增加到 5%～6%时，合金的屈服强度和抗拉强度达到最大值。继续增加锌的含量，γ (MgZn) 在热处理时不能完全固溶进α (Mg) 中，合金强度不再继续增加甚至有所下降。

Mg-Zn 系合金的结晶温度间隔比 Mg-Al 系合金大许多，非平衡状态下最大可达 290℃，所以 Mg-Zn 二元合金的铸造性能很差。在非平衡凝固条件下，锌在镁中的最大固溶度约为 3.5%，当锌含量更多时，合金组织中共晶体的数量增多，但合金的热裂和缩松并不因为共晶体的增多而改善。如 Mg-Zn 合金中锌含量从 2%增加到 6%时，合金的缩松和热裂倾向大幅度增加，这是因为合金中锌含量较高时，在凝固过程中，后凝固的富锌的合金液体密度增大，而先凝固的α (Mg)固溶体密度却较小，二者密度相差大。导致凝固时α (Mg)晶体容易上浮，而富锌的合金液向下流动，在一定小范围内液体不易向上补缩，结果锌含量增高反而使缩松严重。同时，锌含量增多使合金α (Mg) 树枝晶粗大，促使缩松加剧。锌含量使合金热裂倾向变大是由于共晶体中β (Mg_7Zn_3)相具有热脆性，同时缩松的加剧也使合金容易热裂。在铸造镁合金中 Mg-Zn 合金的热裂倾向是最大的。因此，从力学性能和铸造性能综合考虑，锌含量在 5%～6%是较适宜的。

此外，Mg-Zn 合金中加入 Zr 除了可以细化晶粒外，Zr 还可以明显缩小合金的结晶温度间隔。如 Mg-4.5%Zn 合金中加入 0.7%Zr 后，平衡态结晶温度间隔由 180℃下降到 90℃，非平衡态则由 290℃下降到 110℃，这样大大降低了合金的缩松和热裂倾向，提高合金的铸造性能和力学性能。

在铸造 Mg-Zn-Zr 合金中，典型合金时牌号为 ZK51 或 ZK61 (Mg-5.5%～6.5%Zn-0.7%Zr) 的合金。该合金中，锌大多富集在枝晶网边界，锆富集在晶粒内部，由于含锆量低，一般不会出现含锆的化合物。该合金典型组织为具有明显成分偏析的α (Mg) 基体晶界上断续分布少量γ (MgZn) 相。均匀化退火后，少量γ (MgZn) 相残留在晶界上，而基体中弥散析出二次γ (MgZn) 相质点。若经 T4 处理，则晶界上的γ (MgZn) 相先完全溶入到基体中，随后人工时效时，则在基体中析出弥散γ (MgZn) 质点。由于铸件 T6 与 T5 状态力学性能相差不大，该合金常在 T5 状态下使用，即铸造后直接人工时效。ZK61 合金力学性能明显高于 AZ91 合金，因此它有更高的承受载荷的能力。与 AZ91 合金比较，此合金铸造时充型能力较差，焊接性能差，因此它一般用于砂型铸件，金属型仅铸造简单小型件。由于它具有高的承载能力，近年来已用其代替 AZ91 合金铸造飞机轮毂、起落架支架等受力铸件。

Mg-Zn-Zr 系合金的物理性能见表 3.3-12，力学性能见表 3.3-13 和表 3.3-14。

表 3.3-12 镁-锌-锆系合金的物理性能

物理性能	ZK51	ZK61
20℃密度/g·cm^{-3}	1.83	1.83
凝固温度区间/℃	550～640	520～635
20～200℃线胀系数 /10^{-6}K^{-1}	27.1	27.0
比热容/kJ·(kg·K)$^{-1}$	1.02	1.02
20℃热导率/W·(m·K)$^{-1}$	110	113
电阻率/nΩ·m	62	62

表 3.3-13 镁-锌-锆系 ZK51 合金的力学性能

温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/ %
25	275	180	8
95	205	145	12
1 501	160	115	14
205	115	90	17
260	83	62	16
315	55	41	16

表 3.3-14 镁-锌-锆系 ZK51 合金的蠕变性能

承载时间/h	蠕变极限/MPa			
	0.1%	0.2%	0.5%	1.0%
95℃				
1	47	85	138	—
10	46	83	131	—
100	42	76	125	—
1 000	37	68	114	—
150℃				
1	43	74	112	—
10	43	71	105	—
100	41	68	99	—
1 000	34	63	86	—
205℃				
1	38	67	104	—
10	33	56	91	—
100	23	41	74	—
1 000	14	23	37	—
260℃				
1	28	39	55	66
10	16	23	35	43
100	7	12	21	25
1 000	6	7	10	12

2.2 Mg-RE-Zr 系合金

Mg-RE-Zr 系合金是耐热镁合金，适用在 200～300℃工作。

此类合金稀土元素是主要组元，合金中最常见的稀土元素是铈（Ce）、镧（La）、钕（Nd）、镨（Pr）。镁与大部分稀土元素形成固溶体，相应的二元系的富镁一侧是简单共晶，共晶温度较高。大多数稀土元素（除钕、钇等外）在α（Mg）固溶体中的固溶度都极小且在400℃以下几乎无变化，在镁中加入铈基或钕基混合稀土亦是如此。形成的第二相 Mg_9Ce、$Mg_{12}Nd$ 等金属间化合物，在高温下比较稳定，不易长大；它们又都有很高的热硬性。由表3.3-15可见，镁稀土化合物在室温时的显微硬度和镁合金中常见的 $Mg_{17}Al_{12}$、MgZn 等化合物相比是较低的，然而在高温时却比它们高得多。这些化合物在晶间分布可以减弱晶界滑动，因而使镁-稀土合金具有优秀的蠕变性能。由于这些原因，Mg-RE 类合金均有良好的热强性。

稀土元素对镁的力学性能的增强基本是按镧、铈、富铈稀土、镨、钕的顺序排列，即随原子序数的增加而增加。由于稀土元素分离提纯工艺很复杂，因此镁合金中多使用混合稀土，最常用的是富铈混合稀土，其稀土总量不小于98%，含铈量≥45%，它在合金中的作用、对性能的影响与纯铈类似。另一种是富钕混合稀土，含钕量≥45%，在镁中的效果与纯钕类似，但混合稀土成本却大大降低。

表3.3-15 镁合金中各相在不同温度下的硬度（保持60 min）

相的名称	20℃	150℃		200℃		250℃		300℃	
	HV	HV	降低/%	HV	降低/%	HV	降低/%	HV	降低/%
Al_2Ca	356	350	18	318	109	310	129	294	174
Mg_4Th	234	21	102	190	187	161	309	139	407
Mg_9Ce	158	145	82	117	206	102	355	85	460
α－Mn	935	845	96	654	300	544	417	475	493
$Mg_{12}Nd$	169	157	76	136	196	102	397	36	790
Mg_4Al_3	175	149	147	104	407	42	760	13	927
Mg_2Ca	149	127	148	63	507	15	899	10	934
MgZn	246	124	491	99	597	53	783	21	915

Mg-RE 合金二元共晶相图可说明大多数含稀土的镁合金具有良好的铸造性能。因为该类合金的结晶温度间隔较小（最大结晶温度间隔：Mg-Ce 系为57℃、Mg-La 系为76℃、Mg-Nd 系为100℃），合金中有较多的共晶体，所以它的铸造性能好，其缩松、热裂倾向较 Mg-Al、Mg-Zn 类合金小得多，充型能力也较好，可用于铸造形状复杂和要求气密性高的铸件。

Mg-Ce 系 EK41［Mg-（3%～4%）Ce-0.6%Zr］合金是典型的 Mg-RE 合金之一。合金中 Ce 或者富铈混合稀土是主要组元。合金显微组织为α（Mg）基体晶界上网状分布着共晶体中的 Mg_9Ce 等化合物，退火后少量化合物以小质点自晶内析出。此合金存在较多的脆性共晶体，故其室温力学性能不高，但共晶体中稀土化合物有较高的热硬性，其高温力学性能较好。由于铈在镁中的固溶度极小，故热处理强化效果很低，因此合金常用铸态及 T2 状态。合金典型力学性能为 σ_b = 140 MPa、$\sigma_{0.2}$ = 90 MPa、δ = 2.5%。250℃高温下 σ_b^{250} = 130 MPa、σ_{100}^{250} = 60 MPa、$\sigma_{0.2/100}^{250}$ = 30 MPa，在250℃下有良好的抗蠕变性能，适用于在150～250℃范围长期工作的零件。

当稀土含量增加时，一开始强度急剧升高，稀土超过1%后，抗拉强度略微下降，而伸长率则不断下降。这是因为稀土含量增加时，在α（Mg）基体晶界上的共晶体量也不断增加，由于稀土第二相的强化作用使强度增高。当共晶相在α（Mg）晶界上逐渐联成网状分布时，削弱了基体的整体性，故塑性不断下降。该合金的热强性也随稀土含量的增加而显著升高，因为α（Mg）晶界上的共晶体是含稀土的耐热相，它的出现和增多引起高温强度急剧增加。

该合金的铸造性能良好，缩松、热裂倾向小，充型能力良好，气密性高。可用于铸造大型复杂铸件和室温下要求高气密性的铸件，如发动机壳体、箱体零件等。铸件的壁厚效应小。此合金的抗蚀性良好，优于 AZ91 合金。尤其是该合金焊接性良好，铸件可焊补。

Mg-Nd 系合金是另一类典型 Mg-RE 合金，该合金中富钕混合稀土是主要组元。在室温下 Mg-Nd 合金的力学性能最好，热处理强化效果很高；而 Mg-La、Mg-Ce、Mg-Pr 等合金则强化效果很小。这是因为钕在镁中有较大的固溶度（最大为3.6%Nd）并随温度变化而有较大的变化。250℃下高温性能也是 Mg-Nd 合金最高，而 Mg-La 合金最差，这也是由于 $Mg_{12}Nd$ 在250℃热硬性高，耐热性高，高温下钕原子在镁中的扩散速度相对最低的缘故。

对 MgNd 合金，热处理后一般按照过饱和固溶体（SSSS）→GP 区→β″（Mg_3Nd）→β′（Mg_3Nd）→β（$Mg_{12}Nd$）的顺序脱溶。根据上述时效相变规律，在时效初期，首先从过饱和固溶体中析出与基体共格的 GP 区，合金在4～10 h 内保持有一个较稳定的硬度平台，这是由于 GP 区形成和同样与基体共格过渡相β″析出，hcp 结构，$(0001)_{\beta''} // (0001)_{Mg}$，$\{10\bar{1}0\}_{\beta''} // \{10\bar{1}0\}_{Mg}$ 的硬化作用造成的。随着脱溶过程的进行，有与基体半共格的β′相析出，fcc 结构，$(011)_{\beta'} // (0001)_{Mg}$，$\{111\}_{\beta'} // \{2\bar{1}\bar{1}0\}_{Mg}$。其中过渡相β″、β′起主要的强化作用。经固溶处理后，铸造组织枝晶网胞间及晶界上的化合物完全溶解，在时效时再以细小弥散的化合物形式从α(Mg)基体中析出，所以有很好的时效硬化效果。热处理在很大程度上发挥了合金的潜力。

在含2.0%～2.8% Nd 的 Mg-Nd 合金中加入0.2%～0.7%Zn，合金显微组织为α（Mg）固溶体和沿晶界分布的块状化合物 Mg_{12}（Nd，Zn）。经固溶处理后，化合物大部分溶入固溶体，仅少量残留于晶界上，同时晶内析出密集点状相。经时效后，除析出相稍有增多外，组织无明显差异。这些析出相为 Mg_{12}（Nd，Zn），可以提高合金的室温强度。其典型力学性能为 σ_b = 240 MPa、$\sigma_{0.2}$ = 140 MPa、δ = 5%。σ_b^{250} = 150 MPa、σ_{100}^{250} = 75 MPa、$\sigma_{0.2/100}^{250}$ = 35 MPa。在250℃下的蠕变和持久强度及瞬时拉伸性能优于含 Ce 的 EK41 合金，室温性能更高得多。可用于250℃下长期工作或室温下要求高强度和气密性的零件。

加入银可以明显改善 Mg-RE 合金的时效硬化效应。根据这些结果开发了 QE22、QH21 及 EQ21 等一系列高性能 Mg-

RE 合金。含银的 Mg-RE 合金在室温下显示了良好的抗拉性能（图 3.3-6）。最广泛应用的是 QE22（Mg-2.5% Ag-2Nd-0.7Zr）合金。该合金在 525℃固溶处理 4～8 h，然后时效 8～10 h。其沉淀产物和析出序列与 Mg-Nd 合金相似，生成 Mg-Nd 化合物，但 Ag 含量的增加可以使析出的弥散强化相体积分数增加，最终平衡相为 $Mg_{12}Nd_2Ag$ 相，该相可能是 DO_{19} 结构，这种相有很高的强化效果和热稳定性，因此温度达 200℃时，QE22 及 EQ21 具有 175 MPa 以上的屈服强度。高于 200℃，QE22 屈服强度迅速降低，而 EQ21 则直到 250℃仍具有优秀的强度性能。QE 合金具有良好的疲劳抗力（图 3.3-7）。200℃时，QE22 的疲劳强度超过 80 MPa。QE 合金的蠕变强度可与 EZ33 相媲美。因此这类合金的各项综合性能超过大多数的镁合金，被应用在航空航天等领域。由于银的价格较贵，目前正在研究用铜代替银的可能性。在该类合金中用 Th 代替部分稀土获得的一种新合金 QH21（Mg-2.5% Ag-1% Th-1% Nd-0.7% Zr），时效时可以形成更加细小弥散的析出相，而且这种沉淀相的粗化率极低，使合金的高温稳定性获得进一步的提高。

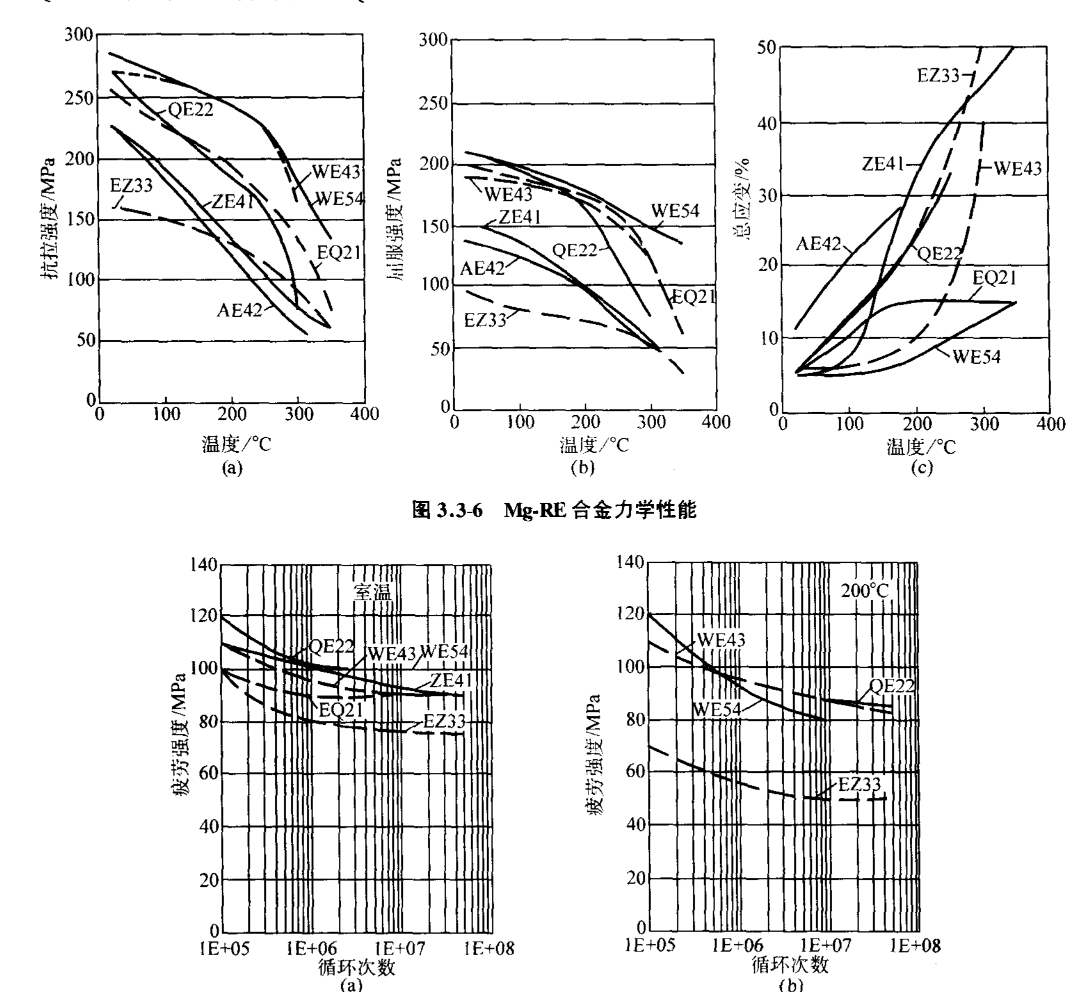


图 3.3-6　Mg-RE 合金力学性能

图 3.3-7　Mg-RE 合金室温及 200℃下的疲劳强度

镁中添加钇具有有利的影响是非常重要的发现，开发出一系列高温下具有高强度及高抗蠕变性能的含钕及钇的 WE 型合金。该类合金有类似普通铸造铝合金的优秀耐蚀性。以典型的铸造 WE54 合金为例，该合金含 4.75%～5.5% Y、1.5%～2% Nd、0.4%～1.0% Zr 以及 2% 重稀土元素。钇常以富钇混合稀土形式加入，其中约 75% Y，其余为重稀土。加入钇和钕增加铸态共晶相的体积分数，进行固溶处理使共晶相溶解（仍会残留小体积分数的钕基共晶）。时效析出开始于 170～200℃间，首先析出六方的，平行于 β″ 镁基体 $\{10\bar{1}0\}$ 面，该相为 DO_{19} 超点阵结构，随后在 200～250℃形成体心正交的 β′ 相。这些沉淀产物也与镁基体有一位向关系。300℃以上，在晶内及晶界上生成不均匀分布的平衡的 β 沉淀相。

在室温及高温下，WE54 的抗拉强度、疲劳强度及蠕变强度均优良（图 3.3-6～图 3.3-8），且可与铸造铝合金相媲美。在稍高温度暴露 1 000 h 以上后，室温下 WE54 的延展性降至规范值 2% 以下。在使用温度为 150℃时，β″沉淀相生成并与已存在的 β′相共存。β″的体积分数增加使脆性增加，而 β″的体积分数又与时效温度和使用温度下固溶度差有关。WE43 合金含钕及钇稍低，使强度性能有些下降，但有满足要求的延展性。与其他镁合金相比，WE43 的力学性能是优秀的。WE43 用于赛车及飞机（如 Mc Donnell Dougles MD500 直升飞机）等的变速器壳体。

最近国外研究了含钐（Sm）、钆（Gd）及重稀土金属的实验镁合金。除铒（Er）和镱（Yb）外的重稀土金属在镁中溶解度增加到大约 10%。加入钆和镝（Dy）可获得卓越的力学性能，但要达到这些性能，需要 10% 以上的钆和镝。例如，图 3.3-9 表示了 Mg-9.4% Gd-4.8Y-0.6% Mn 合金的拉伸实验数据。该类合金实际应用时需要考虑的一个问题是稀土金属的高昂价格。镁-钐合金是进一步研究的一个令人感兴趣的领域。钐在镁中最大溶解度为 5.7%，因而提供了良

好的固溶强化及沉淀硬化的可能性。重稀土元素从钆（Gd）到镱（Yb）需要10%以上才能达到同样硬化效应。二元 Mg-6%Sm 合金 T6 状态的抗拉强度与 WE43 相似，但其屈服强度较低。

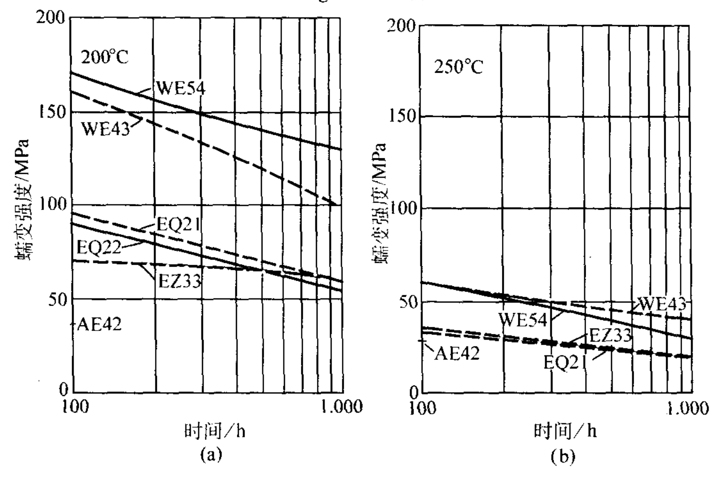


图 3.3-8　Mg-RE 合金的蠕变强度

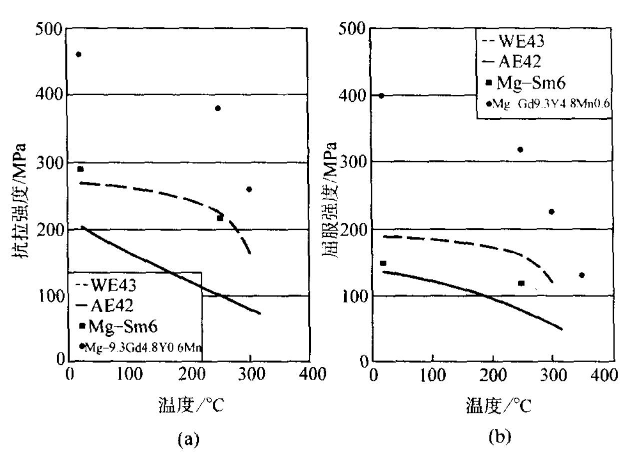


图 3.3-9　Mg-RE 合金力学性能与温度关系

Mg-RE-Zr 系合金物理性能见表 3.3-16。力学性能见表 3.3-17。

表 3.3-16　镁-稀土金属-锆系合金的物理性能

物理性能	EQ21A	EZ33A	QE22A	WE43A	WE54A
熔化温度范围/℃	540～640	545～640	535～640	550～640	550～640
比热容（20～100℃）/kJ·（kg·K）$^{-1}$	1.00	1.04	1.00	0.966	—
线胀系数（20～200℃）/$10^{-6}K^{-1}$	26.7	26.8	26.7	—	—
热导率（50℃）/W·（m·K）$^{-1}$	113	102.7	113	51.3	52
密度（20℃）/g·cm^{-3}	1.83	1.80	1.82	1.84	1.85
电阻率/nΩ·m	68.5	75	73	148	173

表 3.3-17　典型的镁-稀土-锆系合金的力学性能

合金	状态	抗拉强度/MPa	拉伸屈服强度/MPa	压缩屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度HB
EQ21A	T6	235	195	195	2	65～85
EZ33A	T5	160	110	110	2	50
QE22A	T6	260	195	195	3	80
QH21A	T6	275	205	—	4	—
WE43A	T6	250	165	—	2	75～95
WE54A	T6	250	172	172	2	75～95

2.3　其他含锆镁合金系的特性

和稀土元素一样，钍也可以有效提高镁合金的蠕变抗力，并且可以提供高达350℃温度下的优良力学性能，此外钍也能改善合金铸造性能，而且 Mg-Th 系合金还可以焊接。

工业上已经可以制备三元 Mg-Th-Zr 合金，如 HK31A（Mg-3%Th-0.7%Zr），该合金在铸态下的显微组织类似 Mg-RE-Zr 合金，通常进行 T6 处理，而且其时效过程与 Mg-RE-Zr 合金也很类似，在低温时可能形成 GP 区，沉淀序列是：SSSS→β″→β′→β（$Mg_{23}Th_6$）。β″是有序的 DO_{19} 结构，薄盘形，与基体的｛$10\bar{1}0$｝或｛$11\bar{2}0$｝面共格，化合物的分子式为 $MgTh_3$ 或 Mg_3Th，一般认为是后一种化合物，这样可以提供和基体之间的低的界面能。发现两种半共格的 $β'_1$ 和 $β'_2$ 过渡相，这种半共格的过渡相总是在位错线上形核。β″相可以直接转变成平衡 β 相，锆的存在有利于 $β'_1$ 或 $β'_2$ 相的形成，因为这两个相均可在含锆化合物周围产生的位错线上形成。这些过渡相和最后的平衡相都有很高的热稳定性，在高达350℃温度下均阻碍组织粗化。

在含 Th 的合金中加入锌可以进一步提高合金的蠕变强度，在 Th∶Zn 为 1.4∶1 时效果最好，例如 HZ32A（Mg-3%Th-2.2%Zn-0.7%Zr）和 ZH62A（Mg-5.7%Zn-1.8%Th-0.7%Zr）。这类 Mg-Th-Zn-Zr 合金有非常高的室温、高温综合力学性能并可以被开发为变形镁合金材料。钍是提高镁合金高温性能最有效的合金元素，但钍的低放射性限制了 Mg-Th 合金的应用。

3　镁合金的熔炼铸造工艺

由于镁合金的一些特殊铸造性能和铝合金相差较大，其熔炼铸造工艺比铝合金复杂。在生产铸件时，镁通常在低碳钢坩埚中进行熔炼、精炼或净化。由于熔融镁的氧化膜不能防护镁的进一步被氧化，在温度高于 850℃时曝露的金属液面会自燃，因此在熔炼和铸造过程中都需要保护。在保证充型的条件下，一般采取尽量低的浇注温度（720～780℃），以降低熔体的氧化速度。

一般采用碱金属和碱土金属的氯化物和氟化物以及不活泼的氧化物作为镁合金熔炼时的熔剂，镁合金的熔剂一般分成两类，一种是在熔化阶段使用，主要由氯化物混合组成，如 $MgCl_2$、KCl 和 NaCl。另一种是精炼剂，除包含上述成分外还有 CaF_2、MgF_2 和 MgO 等，这种精炼剂在合金化和精炼过程中隔绝空气并除去熔体中的杂质。但氯化物熔剂本身的去除也很重要，否则它们对镁及镁合金的耐蚀性有很坏的影响。

总体上讲，镁及镁合金材料的铸造性能良好，一些常规铸造方法，如重力铸造法、低压铸造法、半连续铸造法等，已较成熟地应用在镁合金的铸造中。一些新型的铸造技术和铸造方法，如压力铸造、Thixomolding™专利技术等可以大大提高了铸造镁合金的性能，被用来开发新型镁合金材料，并取得了很大的发展和应用。几乎所有的铸造方法都可以用来生产镁合金，某种合金铸造方法的确定是根据设计需要、应用领域、结构和性能要求以及所需铸件数量来决定。

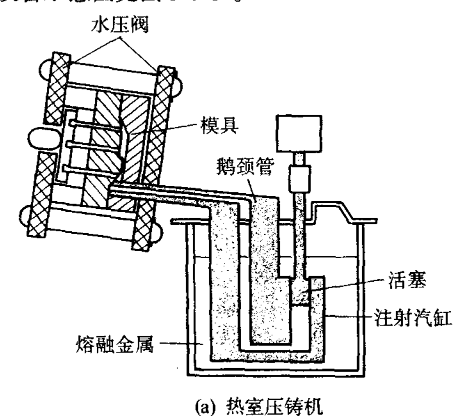
砂型铸造是镁合金应用最成熟的工艺，由于镁的物理和化学性质的特殊性，砂型铸造时应遵循一些原则。首先在砂型铸造使用的型砂中必须加入适当的抑制剂以避免熔融的镁和水汽反应，对生砂或充二氧化碳提高结合力的砂用硫做抑制剂，对合成砂加入如 KBF_4 和 $KSiF_6$ 化合物，还可以加入硼酸作为抑制剂。其次，镁液在浇注过程中尽量保持流动平稳以减少氧化，特别是由于镁和镁合金的密度低，浇口和冒口辅助填充模型的压头小，铸型必须有很好的排气孔排除空气。再次，镁的体积热容量较低，需要有较大的冒口，由于冒口较大，镁及镁合金浇注的金属比实际铸件的体积要大得多，可以高达 4:1。

镁及镁合金永久型铸造的过程和砂铸造的特点相似，但由于其凝固速度较快，可以得到较细的晶粒和较高的力学性能。

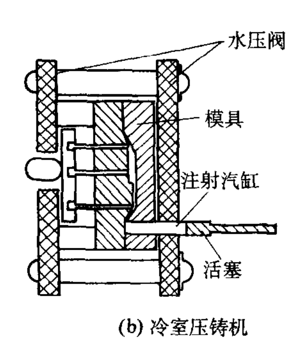
镁的优良铸造性能尤其是低熔点和低的熔化能量的特点，使镁及镁合金材料适合采用压铸方法生产。镁合金采用压铸工艺生产，其生产率高，铸件精度高，铸造时合金的流动性好，凝固潜热小，凝固时间短，铸件表面品质好，凝固后的组织优良并可以生产出薄壁及复杂形状铸件。镁合金压铸分低压铸造和高压铸造两类，一般镁合金的压铸即指高压铸造。在压铸装备上，镁合金压铸法可采用热室和冷室技术。热室压铸法中，压铸机冲头处在熔体内部（图 3.3-10）。热室压铸的优点是生产率高，熔体温度低，压铸模寿命长和熔体保护好。但热室压铸机昂贵，维修复杂。一般对于尺寸相对较小和薄壁铸件采用热室压铸机压铸。冷室压铸机中，冲头与熔化炉分开，其相应的优缺点几乎与热室机相反，熔体从熔炼炉到压射缸的输送要求特殊系统。一般对于厚壁铸件采用冷室压铸机。

半固态成形是将金属或合金在固相线和液相线温度区间进行加工成最终产品的一种新工艺。20 世纪 80 年代 DOW 化学公司首创了镁合金半固态成形工艺。在此基础上，1990 年开发出 Thixomolding™专利技术，将传统压铸技术与注射成形技术结合起来，无需熔化设备，避免了镁合金熔化时工艺上的麻烦，可用于解决传统压铸技术不能解决的技术问题。

1990 年开发出触变铸造（Thixocasting）或称触变成形（Thixoforming, Thixomolding）专利技术，它是将经搅拌等工艺获得的具有非枝晶组织的半固态坯料冷却凝固后，按所需尺寸下料，重新加热到半固态温度，然后进行压铸或挤压成形。由于半固态金属坯料的加热、输送很方便，并且成形过程容易控制，便于实现自动化操作，因此半固态触变成形是当今半固态铸造的主要工艺方法，该技术将传统压铸技术与注射成形技术结合起来，无需熔化设备，避免了镁合金熔化时工艺上的麻烦，可用于解决传统压铸技术不能解决的镁合金应用问题。美国 The Dow Chemical Co. 开发的镁合金射铸成形设备示意图见图 3.3-11。



(a) 热室压铸机



(b) 冷室压铸机

图 3.3-10 镁合金热室和冷室压铸机示意图

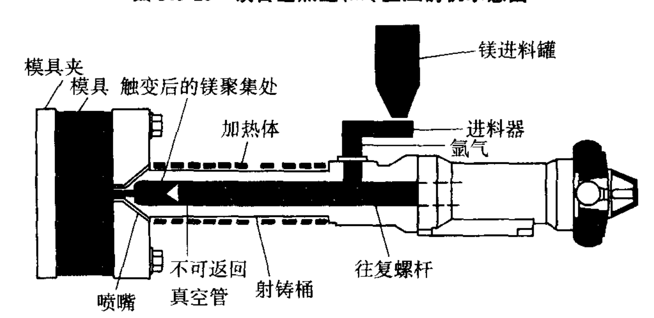


图 3.3-11 镁合金 Thixomolding 技术设备示意图

此工艺方法与流变铸造的区别在于不需要事先将原材料经搅拌成为半固态浆液。它与触变铸造的区别在于不需要将半固态浆液制成半固态铸锭，再将铸锭加热后送入成形设备，而是类似于塑料的注射成形法，因此简单、干净，其工作原理是由普通铸锭利用专用的装置以机械的方式切成 3 ~ 6 mm 左右的粒状，在室温下通过料斗送入高温螺旋混合机加热，加热能量由感应加热线圈和电阻加热元件提供，在加热区内同时受到机器剪切与加热；采用惰性气体 Ar 作为保护性气体，而不采用造成温室效应的 SF_6，当金属加热到半固态后，进入定量触变浆料（固相分数为 30% ~ 50%）收集器，达到定量后以混料螺旋为活塞，通过喷嘴高速射入压铸模具内，经充填凝固得到制品。特点是从固体坯料到铸件在一个装置内完成，省去了外部熔融金属的处理及运输工序。但由于工艺与设备的局限性，该工艺对材料的选择性较小，常用的只有 AZ91D、AM50A 和 AM60B 等几种合金，而目前最成功的是 AZ91D 合金铸件生产。

编写：余 琨（中南大学）
审稿：田荣璋（中南大学）

第 4 章　变形镁合金

与其他许多金属材料相似，镁合金根据其生产方式的不同，可以分为铸造镁合金与变形镁合金两大类。与铸造镁合金相比，变形镁合金材料更具有发展潜力，通过变形可以生产尺寸多样的板、棒、管、型材及锻件，并且可以通过材料组织结构的控制，热处理工艺的应用，获得比铸造镁合金材料更高的强度，更好的延展性，更多样化的力学性能，从而满足更多样的结构件的需求。高性能变形镁合金在与其他结构材料的竞争中脱颖而出，毫无疑问会得到更加广泛的应用和更大的市场份额。目前，由于整体上镁合金市场较小，因此变形镁合金的潜力常常被忽视，而变形镁合金是未来空中运输及陆上运输的重要结构材料，而且更着重在尖端部门的应用，要使镁合金更大量地应用于结构件上，必须发展变形镁制品（包括轧制薄板或厚板、挤压件、锻件）。图 3.1-2 对比了变形镁合金与普通铸造、压铸镁合金的典型力学性能，从图中可见变形镁合金具有更大的优势。

镁的晶体结构为密排六方（hcp）结构，$a=0.3209$ nm，$c=0.5211$ nm，$c/a=1.6236$，与理论值 1.633 十分接近。因此，多晶密排六方结构的镁，室温下塑性变形仅限于基面 $\{0001\}$ $<11\bar{2}0>$ 滑移及锥面 $\{10\bar{1}2\}$ $<10\bar{1}1>$ 孪生（图 3.2-1)。产生一般的形状变化时，与铝比较，镁的滑移系少是造成多晶镁及镁合金不容易产生宏观屈服而容易在晶界产生大的应力集中的原因，因而塑性变形能力差。纯镁的棱柱滑移面 $\{10\bar{1}0\}$ $<11\bar{2}0>$ 不活泼，只有在较高温度下（一般高于 225℃）才可以被激活，从而使镁的塑性得到很大的提高，伸长率比室温下可提高将近 10 倍。因此，工业上变形镁合金产品的压力加工都是在较高的温度下进行热加工。

变形镁合金主要通过挤压、轧制、锻造等压力加工方法在 300～500℃ 下生产。由于镁合金自身的性质和变形的特点，变形镁合金产品有以下一些特点。

1）由于镁的晶体结构特点，当塑性变形后，变形镁合金的很多性质会出现择优取向，即具有一定的方向性。但是对于 hcp 结构的镁而言，弹性模量不受晶体取向的影响，对变形镁合金产品而言，各个方向上的弹性模量是相差不大的。

2）在比较低的温度挤压会使基面以及 $<10\bar{1}0>$ 方向近似地平行挤压方向。进行轧制会使基面平行于薄板表面，且使 $<10\bar{1}0>$ 方向平行于轧制方向。

3）由于孪生在压应力平行于基面时迅速发生，变形镁合金的纵向屈服应力在压缩时比在拉伸时低，两者的比值 $\sigma_{压}:\sigma_{拉}\approx 0.5\sim0.7$，当材料的结构设计涉及到如弯曲等不均匀塑性变形情况时需特别注意。因此这个比值是变形镁合金的重要特征。不同的合金这个比值是不一样的，晶粒细小时这个比值会增加，这是因为晶界对整体强度的作用相应增大的原因。

表 3.4-1　典型变形镁合金的化学成分（质量分数）　%

合金	Al	Mn	Zn	Zr	稀土	Th	Ca	Si	Cu	Ni	Fe	其他杂质	Mg
AZ31B	2.5～3.5	0.20 min	0.7～1.3	—	—	—	0.04 max	0.30 max	0.05 max	0.005 max	0.005 max	0.30 max	余量
AZ31C	2.5～3.5	0.20 min	0.6～1.4	—	—	—	0.04 max	0.30 max	0.10 max	0.03 max	—	0.30 max	余量
AZ61A	5.8～7.2	0.15 min	0.4～1.5	—	—	—	—	0.30 max	0.05 max	0.005 max	0.005 max	0.30 max	余量
AZ80A	7.8～9.2	0.15 min	0.2～0.8	—	—	—	—	0.30 max	0.05 max	0.005 max	0.005 max	0.30 max	余量
M1A	—	1.20 min	—	—	—	—	0.08～0.14	0.30 max	0.05 max	0.03 max	—	0.30 max	余量
HM21A	—	0.35～0.80	—	—	—	1.5～2.5	—	—	—	—	—	0.30 max	余量
HM31A	—	1.2	—	—	—	—	2.5～3.5	—	—	—	—	0.30 max	余量
ZE10A	—	—	1.0～1.5	—	0.12～0.22	—	—	—	—	—	—	0.30 max	余量
ZK11	—	—	1.3	0.7	—	—	—	—	—	—	—	—	余量
ZK31	—	—	3.0	0.7	—	—	—	—	—	—	—	—	余量
ZK60	—	—	4.8～6.2	0.45 min	—	—	—	—	—	—	—	0.30 max	余量

4）发生交替拉压的冷卷曲会引起变形产品的强化，在压缩过程中会产生大量孪晶，导致拉伸性能明显下降。

和铸造镁合金一样，变形镁合金也可以分为含锆和不含锆两大类。但不同合金系列的变形镁合金性能上有较大差别，而且即使对于同一种合金，压力加工的方式不同，合金的性能也会有较大的不同，因此变形镁合金一般按照不同合金系和不同加工方式来分类。主要变形镁合金的化学成分见表 3.4-1，为提高合金的变形能力，很多变形镁合金的化学成分与铸造合金有较大区别。根据合金中主合金元素的不同，变形镁合金的性质各具特性，因此可以按不同合金系对

变形镁合金进行分类。

1 Mg-Mn 系合金

Mg-Mn 系合金中含锰量约在 1.2%~2.5%范围内。M1A 是这组合金中最具有代表性的合金。由 Mg-Mn 状态图可知，含 1.3%~2.5%锰的镁合金，在结晶之后具有单相状态（锰溶于镁的 α 固溶体）。随后，在冷却时便发生固溶体的分解并析出 β（Mn）相，这种析出相分布于固溶体的晶界和晶内。正是由于这些弥散相的析出，才使 Mg-Mn 系合金获得必要的硬度与强度。由 Mg-Mn 相图（图 3.2-5）可见，随着温度的变化，锰在镁中的溶解度变化很大，在共晶温度（650℃）最大溶解度达到 2.46%，而在室温下，则降低到接近于零。但是，由于第二相 β 是纯锰，对合金的强化效果不大，所以该系合金是不能通过热处理来强化的。Mg-Mn 合金使用的热处理状态主要是退火态。但是该合金可以通过加工硬化提高其强度。由此可见，Mg-Mn 系合金中加锰的目的不在于强化合金，而在于提高合金的抗腐蚀能力，这类合金的抗腐蚀性也是所有铸锭冶金工艺生产的镁合金中最高的。

在 Mg-Mn 系合金中可以加入少量 Ce（0.15%~0.35%），Ce 一部分溶解于固溶体中，另一部分与镁形成化合物 Mg_9Ce，细小弥散分布于 α（Mg）基体中，起到强化合金和细化晶粒的作用。一般加入铈可提高强度 50 MPa 以上，伸长率提高到 10%以上，而且具有 M1A 合金的所有优点。这种合金具有高的塑性，可以在热态下加工成板材、棒材和各种类型的模锻件。Mg-Mn-Ce 系合金属于新型 Mg-Mn 系镁合金。在镁中加入铈还可以提高镁合金的工作温度，当铈的含量不多时，它以细小弥散状在晶内和晶界上析出。当铈的含量较多时，它和镁形成熔点为 780℃的金属间化合物 Mg_9Ce，分布于晶内和晶界上，强化了晶界，阻止了再结晶晶粒的长大。因此，含铈的镁合金属于热强镁合金，其最高工作温度可达 200℃。但因为合金中所含的化合物 Mg_9Ce，在高温下显微硬度仍然很高，而塑性很低，因此当变形温度较低时，Mg_9Ce 相的存在，将会降低合金的工艺塑性。

M1A 合金的室温密度为 1.77 g/cm³，凝固温度区间是 648~649℃，线胀系数是 $26\times10^{-6}K^{-1}$。M1A 合金典型的室温力学性能见表 3.4-2。典型的高温力学性能见表 3.4-3。应变速率和温度对挤压的 M1A 合金拉伸时的抗拉强度和屈服强度的影响见表 3.4-4。

表 3.4-2 M1A 合金室温力学性能

材 料	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 /%	硬度 HB	抗剪强度 /MPa	压缩屈服强度 /MPa	抗弯强度 /MPa	弯曲屈服强度/MPa
挤压棒材 挤压型材	255	180	12	44	125	83	350	195
挤压管材 挤压空心材	240	145	9	42	—	62	—	—
锻 件	250	160	7	47	110	—	—	—

表 3.4-3 M1A 合金高温力学性能

温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
挤压棒材、型材			
93	186	145	16
120	165	131	18
150	145	110	21
200	117	83	27
315	62	34	53
锻件			
93	165	121	25
120	145	107	26
150	131	93	31
200	114	69	34
260	83	45	67
315	41	28	140

图 3.4-1 是 M1A 合金塑性图。由图可知，M1A 合金在很宽的温度范围内（300~500℃）具有相当高的工艺塑性。无论在静变形或动变形时，每道次允许的变形量都达到 70%~80%。因此可以比较容易地在 350~480℃的温度范围内进行热压力加工。加热温度超过 480℃，合金组织容易产生过热。热变形温度低于 350℃，则变形抗力大大增加。根据 M1A 合金变形的规律，表 3.4-5 给出了 M1A 合金典型的轧制程序。

2 Mg-Al-Zn 系合金

Mg-Al-Zn 系变形镁合金属于中等强度、塑性较高的镁合金材料，其主要合金化元素铝在镁中的含量从 0~8%，锌的含量较低，一般不超过 2%。典型的该系列的合金有 AZ31B~F、AZ61A 和 AZ80A 等。在该系合金中加入的铝、锌，主要和镁形成金属间化合物 $Mg_{17}Al_{12}$ 相和 $MgZn_2$ 相，同时还形成三元金属间化合物 $Mg_{17}(Al, Zn)_{12}$ 相。铝和锌还能在 α（Mg）中形成有限固溶体，并且随着温度的升高，铝和锌在镁中的溶解度逐渐增大。在共晶温度 436℃时，铝在镁中的溶解度为 12.6%。温度降低时，铝和锌在镁中溶解度减少，25℃时，溶解度为 2%，这说明可以用热处理方法来改善该

表 3.4-4 应变速率和温度对挤压 M1A 合金的抗拉强度和屈服强度的影响

温度/℃	抗拉强度（屈服强度）/MPa				
	0.005 min⁻¹	0.05 min⁻¹	0.10 min⁻¹	0.50 min⁻¹	5.0 min⁻¹
24	231（17）	252（181）	259	274（191）	294（201）
93	—（13）	179（150）	187	204（163）	228（177）
149	—（8）	118（107）	124	140（133）	174（163）
204	—（52）	79（69）	83	95（86）	123（119）
260	—（33）	52（46）	55	66（58）	90（83）
316	—（26）	37（32）	39	48（40）	64（55）
371	—（18）	27（23）	29	34（29）	43（34）
427	—	21（18）	21	25（21）	30（23）
482	—	14（12）	14	18（14）	22（21）

系合金的力学性能。

表 3.4-5　M1A 合金典型轧制程序

合金	工序	温度℃	每周期压缩率/%	每道次压缩率/%
M1	板坯粗轧 卷材中轧 精整阶段	450~500 350~450 室温	40~60	10~30 10~40 5

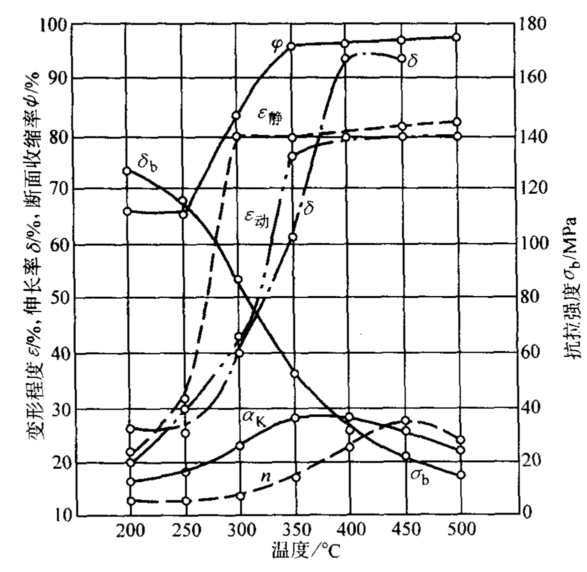


图 3.4-1　M1A 合金塑性图

Mg-Al-Zn 系合金中铝含量超过 3% 时，显微组织主要由 α (Mg)固溶体的晶粒组成，这些晶粒被析出的金属间化合物 $Mg_{17}Al_{12}$［或 Mg_{17}（Al，Zn）$_{12}$］相所包围。合金中金属间化合物 $Mg_{17}Al_{12}$ 的数量随着铝含量的增加而增加。在 Mg-Al 合金中锌含量低于 3%时，大部分的锌会溶入固溶体中，产生固溶强化效应。同时锌还能提高 Mg-Al 合金的伸长率，是变形镁合金有益的合金化元素。但随着锌含量的增加，合金的压力加工性能会恶化，因此变形 Mg-Al 合金中锌含量不宜过高。

Mg-Al-Zn 系合金通过热处理方法提高力学性能的程度，比铝合金或其他一些变形镁合金要小得多。最重要并且应用最广泛的商用变形 Mg-Al-Zn 系合金是 AZ31B 和 AZ31C 两种合金，两者的区别在于容许的杂质含量。AZ31 合金具有较高的强度和良好的延展性，主要是通过控制轧制、控制挤压或锻造温度以及退火或伴生退火效应保留部分加工硬化。镁中加铝及锌导致固溶强化并使晶粒细化。但由于 AZ31 合金元素含量较少，时效强化效果差，一般不进行热处理强化，主要是在加工态和退火状态下使用。因为这种合金的塑性高，所以可以用于制造不同厚度的镁合金板材及形状复杂的锻件、模锻件或挤压件。

由表 3.4-1 可知，AZ61A 和 AZ80A 合金与 AZ31 合金相比，合金中含锰量和含锌量都差不多，主要区别在于含铝量不同，这两种变形合金的含铝量比 AZ31 合金高。Mg-Al-Zn 合金中含铝量越高，形成的硬脆化合物 $Mg_{17}Al_{12}$ 相就越多，合金的强度或变形抗力就越高，而塑性则越低。AZ61 合金因为具有较高的强度和塑性，是很好的挤压和锻造镁合金。但因为它的含铝量高于 AZ31 合金而有较严重的轧制开裂现象，故很少以板材形式提供。此外 AZ61 合金热处理强化效果也比较差，一般也不进行热处理强化。AZ80 合金的特点是强度高，所以多用于制造承受重载的零件，一般经淬火、时效来提高其强度。

Mg-Al-Zn 系变形镁合金的物理性能见表 3.4-6。

表 3.4-6　Mg-Al-Zn 合金物理性能

物理性能	AZ31B，AZ31C	AZ61	AZ80
熔化温度范围/℃	566~632	525~610	490~610
比热容(20~100℃)/kJ·(kg·K)$^{-1}$	1.04	1.05	1.07
线胀系数(20~200℃)/10^{-6}K^{-1}	26.8	27.2	27.2
热导率（50℃）/W·（m·K）$^{-1}$	83.9	80	51
密度（20℃）/g·cm^{-3}	1.78	1.80	1.806
电阻率/nΩ·m	92	125	156

几种典型的 Mg-Al-Zn 系合金的主要室温力学性能见表 3.4-7。在高于或低于室温的不同温度下 AZ31、AZ61 和 AZ80 合金的力学性能分别见表 3.4-8 和表 3.4-9。应变速率和温度对 AZ31 合金拉伸时的抗拉强度和屈服强度的影响见表 3.4-10。表 3.4-11 为塑性加工后 AZ31 合金力学性能表现的方向性。

表 3.4-7　Mg-Al-Zn 合金典型室温力学性能

合金及状态	抗拉强度/MPa	拉伸屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度 HB	抗剪强度/MPa	压缩屈服强度/MPa	抗弯强度/MPa	弯曲屈服强度/MPa
AZ31								
板材软态	255	150	21	56	145	110	485	290
板材硬态	290	220	15	73	160	180	495	325
挤压实心材	255	200	12	49	130	97	385	230
挤压空心材	241	165	16	46	—	83	—	—
锻件	260	170	15	50	130	—	—	—
AZ61								
锻件	295	180	12	55	145	125	—	—
挤压实心材	305	205	16	60	140	130	470	285
挤压空心材	285	165	14	50	—	110	—	—
AZ80								
锻件	330	230	11	69	150	170	—	—

续表 3.4-7

合金及状态	抗拉强度/MPa	拉伸屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度 HB	抗剪强度/MPa	压缩屈服强度/MPa	抗弯强度/MPa	弯曲屈服强度/MPa
AZ80								
锻造 + T5	345	250	6	72	160	195	—	—
挤压实心材	340	250	11	67	150	—	550	350
挤压 + T5	380	275	7	80	165	240	—	—

表 3.4-8　AZ31 合金不同温度下力学性能

温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
板材加工态			
-80	331	234	—
-27	310	234	—
21	290	221	15
100	207	145	30
150	152	90	45
200	103	59	55
260	76	31	75
315	41	21	125
370	28	14	140
棒材挤压态			
-185	434	338	6.0
-130	359	303	7.5
-73	314	262	9.5
-18	283	228	12.5
21	262	200	15.0
93	238	148	23.5
120	217	117	29.5
150	179	100	37.5

表 3.4-9　挤压 AZ61 和 AZ80 合金不同温度下力学性能

温度/℃	抗拉强度/MPa		屈服强度/MPa		伸长率/%	
	AZ60	AZ80	AZ60	AZ80	AZ60	AZ80
-185	379	—	317	—	4	—
-130	355	—	296	—	6.5	—
-73	331	386	265	269	9.5	8.5
-18	317	355	238	252	13	10.5
21	310	338	228	248	16	11.0
93	286	307	179	221	23	18.0
150	217	241	134	176	32	25.5
200	145	197	97	121	48.5	35.0
260	—	110	—	76	—	57.0
315	52	—	34	—	70	—

表 3.4-10 应变速率和温度对 AZ31 合金拉伸时的抗拉强度和屈服强度的影响

温度/℃	抗拉强度（屈服强度）/MPa				
	0.000 5min⁻¹	0.05 min⁻¹	0.10 min⁻¹	0.50 min⁻¹	5.0 min⁻¹
AZ31B 挤压态					
24	263（183）	263（168）	263	263（174）	263（181）
93	—（133）	263（141）	228	232（150）	239（159）
149	—（88）	165（100）	170	182（114）	199（131）
204	—（60）	103（75）	109	125（89）	148（105）
260	—（38）	63（54）	69	83（63）	114（79）
316	—（22）	40（37）	44	55（45）	77（61）
371	—（12）	28（26）	31	41（32）	59（47）
427	—（—）	16（15）	19	26（24）	39（32）
482	—（—）	10（9）	12	17（17）	26（24）
AZ31 板材退火态					
24	249（148）	252（149）	252	254（152）	257（157）
93	186（123）	200（125）	203	213（130）	266（145）
149	131（90）	150（97）	155	167（101）	185（118）
204	64（63）	85（74）	93	114（84）	147（94）
260	40（40）	57（55）	60	70（60）	103（79）
316	23（20）	36（36）	39	48（44）	70（64）
371	14（6）	24（24）	27	34（32）	52（52）
427	—（—）	—（14）	15	17（22）	23（31）
482	—（—）	—（—）	—	15（14）	21（21）
AZ31 板材 H24 硬态					
24	277（207）	279（212）	279	281（217）	283（222）
93	197（160）	215（173）	221	235（187）	254（201）
149	100（100）	139（123）	150	170（142）	198（155）
204	50（45）	70（67）	79	102（96）	159（128）
260	33（26）	46（46）	51	65（65）	100（87）
316	22（14）	31（29）	35	45（45）	69（64）
371	14（7）	21（19）	24	32（32）	48（48）
427	—（—）	12（12）	14	22（22）	35（32）
482	—（—）	—（—）	—	15（14）	21（20）

注：括号中的数据为屈服强度。

表 3.4-11 AZ31 合金力学性能的方向性

状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
平行轧制方向			
退火态	255	150	21
轧制态	290	220	15
垂直轧制方向			
退火态	270	170	19
轧制态	295	235	19

和 Mg-Mn 系合金不同，Mg-Al-Zn 合金对变形温度、变形程度、应力状态等热－力因素的改变比较敏感。因此，Mg-Al-Zn 合金的塑性、变形抗力、再结晶微观组织、力学性能与变形条件之间的关系等都影响该系镁合金加工工艺规范的制定。



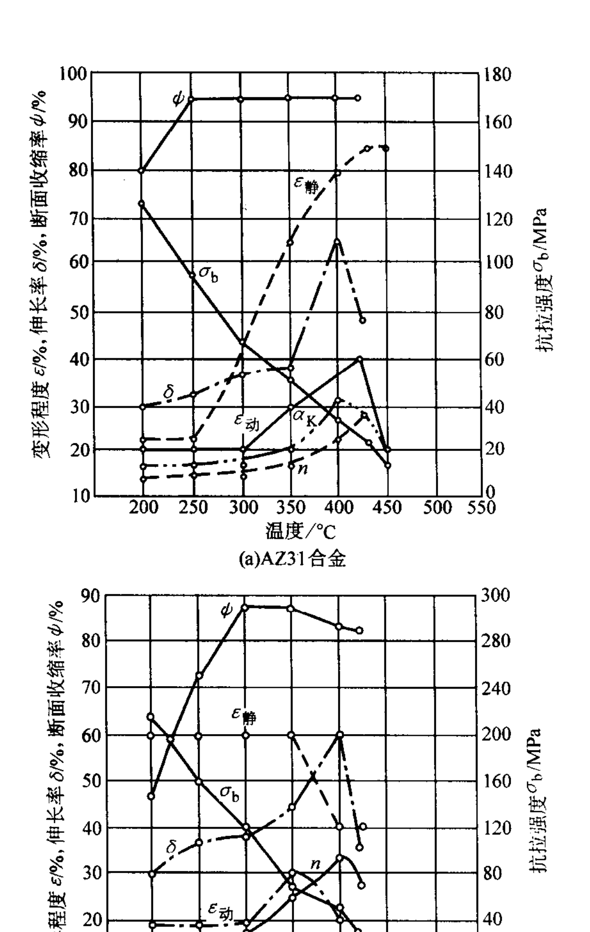


图 3.4-2　Mg-Al-Zn 合金塑性图

图 3.4-2 是 AZ31 合金和 AZ61 合金的塑性图。由图可知 AZ31 合金对变形速度极为敏感，动变形时的允许变形程度不大于 40%。但在静变形时，塑性增加约 1.5 倍，变形程度可达 80%以上而不出现脆性状态。AZ31 合金在压力机上变形时，变形温度在 350～450℃的范围内塑性最高；当在锻锤上变形时，变形温度范围缩小为 350～425℃。根据合金的变形特点，AZ31 合金典型的热轧加工顺序是先在 420～450℃下开轧，每道次压缩率为 10%～20%，总压缩率为 90%～95%。然后按力学性能、尺寸精度和稳定性及表面质量为标准进行终轧。终轧温度可低于 250℃，每道次压缩率 5%，总压缩率 15%～25%，随后在大于 135℃下退火。

AZ61 合金所含主要合金元素是 5%～7%铝。这种合金具有较高的强度和较低的工艺塑性。当在压力机上变形时，在 250～400℃的温度范围内，允许压缩变形程度达 40%～60%。这种合金锻造很困难，在 325～375℃的较窄温度范围内，也只允许有不大于 20%～30%的压缩变形。图 3.4-3 是 AZ61 合金的近似真实应力－应变曲线。AZ61 合金变形抗力随温度升高而减小。当温度达 400℃时，上述近似曲线实际上平行于横坐标轴。

AZ31 和 AZ61 合金的再结晶图如图 3.4-4 及图 3.4-5 所示。当温度达 300℃时，再结晶过程开始。当温度超过 350℃，不管变形程度多大，晶粒均显著长大。在 AZ31 合金的再结晶图上，对应于临界变形程度，曲线比较陡，其再结晶起点，随温度升高而移向较小变形程度方向。AZ31 和 AZ61 合金的临界变形程度与纯镁相近，不超过 10%。对于在热加工温度下晶粒长大倾向比较严重的 Mg-Al-Zn 系镁合金，为了细化其晶粒，应在较低的温度下结束热变形。因为热变形终了时的变形量一般是不大的，不足以使其晶粒细化。如果是两次或多次热加工，还要注意依次降低其变形温度，后一次变形比前一次变形要降低 15℃左右。

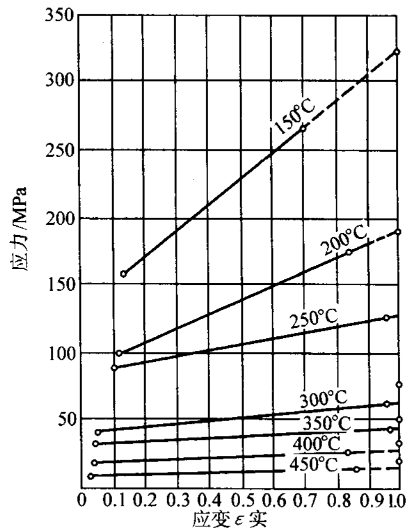


图 3.4-3　AZ61 合金近似真实应力－应变曲线

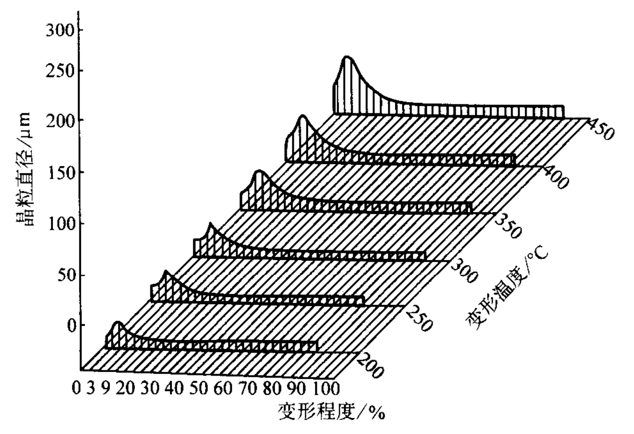


图 3.4-4　AZ31 合金再结晶图

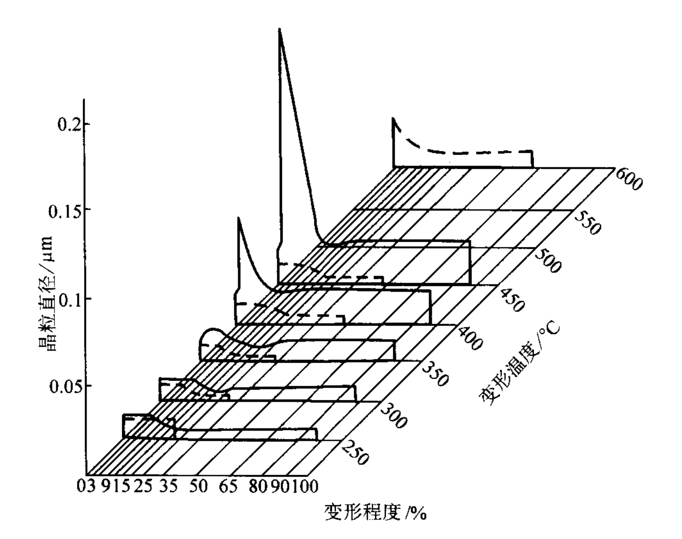


图 3.4-5　AZ61 合金再结晶图

3 Mg-Zn-Zr 系合金

该类合金成分与铸造 Mg-Zn-Zr 合金相似，其铸态下微观组织形貌与 ZK61 铸造镁合金相似，加入少量锆的目的主要是细化晶粒和提高力学性能。ZK21（Mg-2%Zn-0.7%Zr）、ZM21（Mg-2% Zn-1% Mn）、ZK40（Mg-4% Zn-0.7% Zr）和 ZK60（Mg-6%Zn-0.7%Zr）是这一合金系的典型合金。尤其是 ZK60 合金，这种合金不但在热加工态下具有较高的塑性，而且室温下的力学性能也很高，挤压的 ZK60 合金经过时效后，室温强度是常规商用变形镁合金中最高的，而且具有拉伸屈服强度和压缩屈服强度非常接近的优点。该合金没有应力腐蚀的倾向性，室温下的工作性能较好。为了提高其力学性能，可通过淬火、时效进行强化。合金可以在 420℃固溶处理，再在低于和高于 GP 区的温度进行双重时效，即在 90℃24 h + 180℃16 h，获得的比强度（强度/密度）与一些高强铝合金相当。因此，ZK60 合金可以成为发展高强度镁合金很有潜力的一种基础合金。

ZK60 合金密度为 1.83 g/cm^3，凝固温度区间是 520 ~ 635℃，其典型室温力学性能见表 3.4-12。应变速率和温度对 ZK60A 合金拉伸时的抗拉强度和屈服强度的影响见表 3.4-13。

图 3.4-6 为 ZK60 合金的塑性图。由图可知，ZK60 合金属于高强度、低塑性镁合金，变形速度对其塑性有很大的影响，低速变形时，塑性高。合金最大塑性的温度范围较宽（200 ~ 450℃），在此范围内最大压缩率可达 90%；在高速变形时，塑性则显著降低，最大塑性的温度范围缩减到 250 ~ 400℃，在此温度范围内的允许变形程度，不得超过 30% 或 40%。例如在锻造时，考虑到合金在低温时的塑性低和变形抗力大，ZK60 合金的终锻温度应提高到 320℃（锤上锻造）或 280℃（压力机上锻造）。由于 ZK60 合金的过热倾向较大，始锻温度必须降低到 410℃（锤上锻造）或 420℃（压力机上锻造）。

ZK60 合金的变形抗力与变形温度和变形程度之间的关系是：当变形温度为 300℃时，合金的强化倾向非常大，强化的大小决定于变形程度，即强化随变形程度增加而急剧增大。合金在 300℃温度下变形时，变形抗力曲线则有显著变化，合金的变形程度大于 20% 后，便产生明显的软化。当变形程度为 40% 时，变形抗力随变形程度增大而减小，显然与高速变形时合金中产生的热效应有关。

表 3.4-12 ZK60 合金的典型室温力学性能

材料	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度HB	抗剪强度/MPa	压缩屈服强度/MPa	抗弯强度/MPa	弯曲屈服强度/MPa
挤压棒材、挤压型材								
ZK60A-F	340	260	11	75	185	230	550	380
ZK60A-T5	350	285	11	82	180	250	585	405
挤压管材、挤压空心材								
ZK60A-F	315	235	12	75	—	170	—	—
ZK60A-T5	345	275	11	83	—	200	—	—
锻件								
ZK60A-T5	305	215	16	65	165	160	420	285

表 3.4-13 应变速率和温度对挤压 ZK60A 合金拉伸时的抗拉强度和屈服强度的影响

温度/℃	抗拉强度（屈服强度）/MPa			
	0.05 min^{-1}	0.10 min^{-1}	0.50 min^{-1}	5.0 min^{-1}
ZK60A-F 挤压态				
24	347（262）	348（272）	352（283）	356（294）
93	269（183）	274（207）	285（232）	301（256）
149	166（103）	177（137）	201（171）	236（205）
204	93（43）	105（79）	131（114）	169（152）
260	37（17）	42（33）	67（57）	120（103）
316	17（10）	20（16）	34（29）	74（67）
371	12（9）	13（11）	22（18）	50（46）
427	10（—）	10（10）	16（14）	29（24）
482	10（—）	10（8）	16（14）	26（24）
ZK60A-T5				
24	354（274）	356（292）	363（311）	371（329）
93	258（186）	266（217）	285（248）	316（279）
149	170（114）	178（146）	199（178）	239（210）
204	98（45）	107（89）	130（122）	170（155）
260	38（16）	46（35）	70（57）	123（104）

续表 3.4-13

温度/℃	抗拉强度（屈服强度）/MPa			
	0.05 min^{-1}	0.10 min^{-1}	0.50 min^{-1}	5.0 min^{-1}
ZK60A-T5				
316	17（12）	20（17）	35（21）	75（60）
371	13（8）	14（12）	23（21）	47（41）
427	10（—）	11（10）	16（14）	30（25）
482	10（—）	11（10）	16（14）	24（15）

注：括号中的数据为屈服强度。

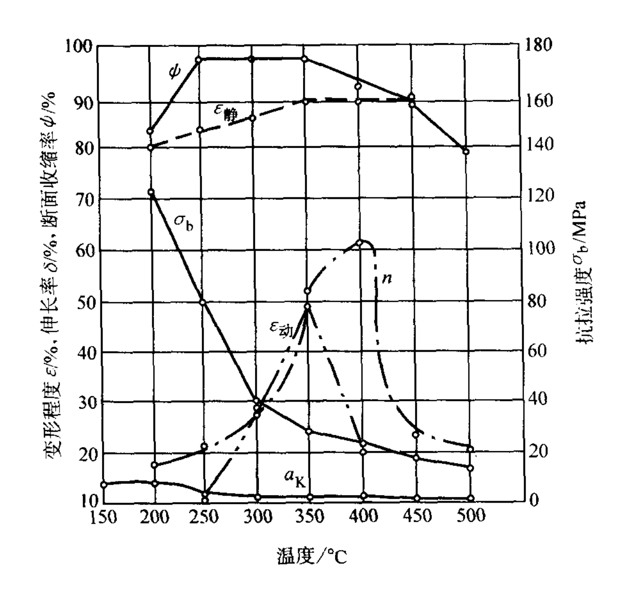


图 3.4-6 ZK60 合金塑性图

4 Mg-RE 系合金

Mg-RE 合金是满足在较高温度下使用的一类镁合金材料。在目前各国的商用变形镁合金牌号中，含稀土的变形镁合金很少出现，例如美国 ASTM 变形镁合金成分中就只有 ZE10A 这个合金，这是因为 Mg-RE 类的合金热强性较高，热变形抗力较大，进行压力加工比普通 Mg-Al 或 Mg-Zn 系合金困难。但是，所有的铸造用 Mg-RE 合金，如典型的 WE43、WE54、QE22 和 EQ21 等合金，在需要的条件下，都可以进行压力加工获得其变形产品。由于受其变形能力的制约，Mg-RE 合金的压力加工常常采用挤压或模锻工艺，少量稀土合金化程度较低的合金也用于轧制板材，但为了提高其成形性能，通常利用挤压或锻造工艺开坯，将同成分的铸造合金变成加工产品。

采用挤压或者锻造的 Mg-RE 类合金主要也是利用它们在高温下的优良力学性能，加入的稀土元素或者钍可以减小晶粒长大及再结晶倾向以及提高晶界变形能力。含 Th 的合金由于室温和高温的塑性都很好，可以进行轧制获得镁合金板材，第一块镁合金板材就是 HK31A-H24 合金。含钍镁合金在 370℃下仍有良好的高温性能，近年来，新的热强 Mg-RE 系合金变形材不断开发出来，在这些新型的变形 Mg-RE 合金中的典型是 WE 型合金。经过挤压后的 WE54 合金室温力学性能提高不明显，甚至低于一些高强的 Mg-Zn-Zr 系 ZK60 等合金，但其力学性能在室温到 250℃范围内几乎不变化，具有优良的高温热强性和热稳定性，其力学性能与 Mg-Al-Zn 系典型高强合金 AZ80 及 Mg-Zn 系 ZK60 变形镁合金的比较见图 3.4-7。而且挤压的 WE54 合金有很高的蠕变抗力，见图 3.4-8。此外，该合金还有优良的低温稳定性，在 0 ~ -200℃温度范围内不出现脆性。因此，该合金和同系列的 WE43 合金一起，成为变形 Mg-RE 系合金中目前开发和应用最广泛的合金，在直升机和一些赛车需要高强度和高热稳定性的零件上使用。

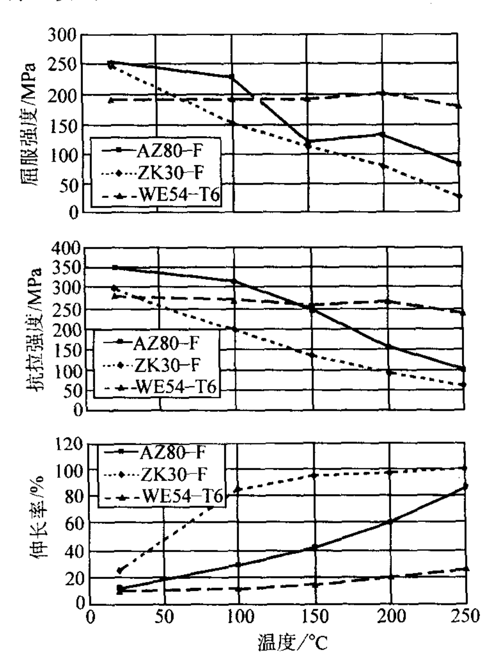


图 3.4-7 不同温度下变形镁合金力学性能比较

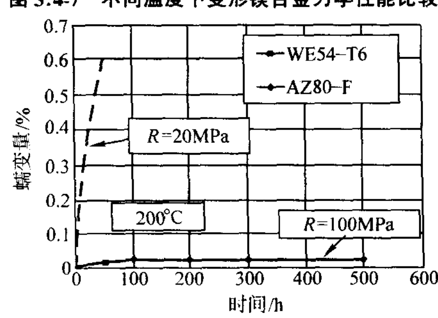


图 3.4-8 变形 WE54 合金与 AZ80 合金蠕变性能的比较

5 Mg-Li 系合金

Mg-Li 系合金是变形镁合金中特殊的一类合金，该系列的合金是结构金属材料中最轻的，也被称为超轻镁合金。根据成分的不同，Mg-Li 合金的密度可以在 0.97 ~ 1.35 g/cm^3 范围内变化，最轻的该系合金密度可以小于水的密度，成为“水上漂浮”的合金，用作结构材料时，可以大幅度减小结构件的质量。此外，在镁中加入合金元素锂，可以使镁的性

质发生特殊的改变。在 Mg-7.9%Li 的共晶成分点上，合金具有极优的变形性能和超塑性。

根据 Mg-Li 二元相图（图 3.2-8），锂在镁中有较大的固溶度。当锂的含量增加到共晶成分以上时，合金中会出现新的β相，这种β相具有体心立方结构，从而提供了合金可以进行冷变形的可能。当合金成分在 8.5%以上时，合金在铸态下显微组织为（α+β），在β相的基体中分布着魏氏组织形貌的α片。在（α+β）和β相界上固溶度线是倾斜的，说明有一些成分的合金是可以进行热处理时效强化的。随着锂含量的进一步增加，二元合金进入β相区，此时可以获得晶体结构为体心立方的镁合金，使常规镁合金的密排六方晶体结构发生了彻底的改变。图 3.4-9 表示了 Mg-Li 合金的伸长性能，Mg-Li 系 LA141A（Mg-14%Li-1%Al）、LS141（Mg-14%Li-1%Si）合金是在β相成分范围内的典型合金，这些合金具有体心立方结构，有优良的冷变形能力，可以进行轧制和挤压加工，而且由于该类合金密度仅 1.35 g/cm^3，具有很高的比强度和比刚度，室温下其弯曲刚度几乎是其他镁合金的 1 倍，是铝合金的 5 倍。该合金可以焊接，已经应用在装甲板、航空和航天结构件上。表 3.4-14 给出了该合金的典型性能。

近年来的研究表明，Mg-Li 合金中痕迹量的钠会引起晶界的脆化，在 Mg-Li 合金中应该添加高纯锂。此外，在 Mg-Li 二元合金中加入第三组元如铝、银、镉及锌后，由于可以生成共格的 Li_aX_b 相，可以产生明显的时效硬化效应。但在稍高的温度下（50～70℃）下性能不稳定，发生过时效，由于对过时效敏感，导致在较低的载荷下就会发生过度的蠕变。图 3.4-10 是温度对 LA141 合金性能的影响，可见温度升高，该合金的性能下降明显。

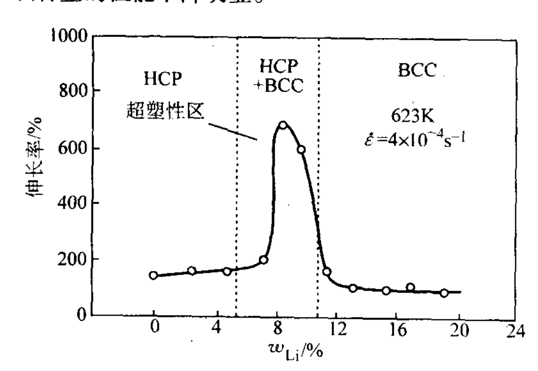


图 3.4-9 Mg-Li 合金的伸长性能

表 3.4-14 典型 Mg-Li 合金室温性能

性能	LA141	LS141
弹性模量/GPa	42	41
抗拉强度/MPa	144	136
拉伸屈服强度/MPa	123	110
伸长率/%	23	23
硬度 HRE	55～56	—
密度/$g\cdot cm^{-3}$	1.35	1.33
线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$	21.8	—
比热容/$kJ\cdot(kg\cdot K)^{-1}$	1.449	—
热导率/$W\cdot(m\cdot K)^{-1}$	80	—
电导率/$n\Omega\cdot m$	152	—

Mg-Li 合金的优势之一是具有很好的塑性变形能力，尤其是具备好的超塑性变形能力。当温度在 250～375℃范围内，真应变速率在 10^{-5}～$10^{-3}s^{-1}$ 范围内时，Mg-8.5%Li 合金具有超塑性行为。在 350℃和 $10^{-4}s^{-1}$ 应变速率条件下可获得达 610%的超塑性。该合金的显微组织由 200℃温轧获得的未再结晶的α相和β相两相混合物组成。观察显微组织和 m 值与超塑应变量之间的关系发现，在超塑应变条件下，显微组织由开始的带状（α+β）组织转变为均匀分布的、等轴的、尺寸为 10 μm 的（α+β）晶粒，而 m 值由 0.4 增加到 0.7。由此可知，超塑变形过程中，Mg-8.5%Li 合金发生了动态再结晶。

在二元 Mg-Li 合金基础上添加 1%Y 获得的三元 Mg-8.5%Li-1%Y 合金，可以在更高的应变速率下（10^{-3}～$10^{-2}s^{-1}$）出现超过 300%的超塑性，并且 Mg-Li-Y 合金的晶粒更加细小，由于晶粒进一步细化可提高 Mg-Li 合金的超塑应变速率和超塑性，有利于该合金在商业上的开发和应用。

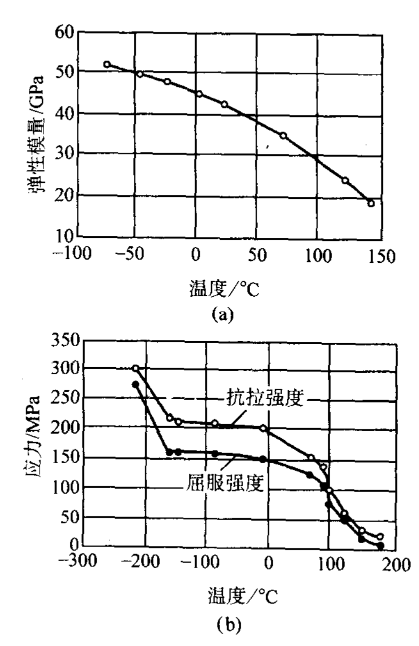


图 3.4-10 温度对 LA141 合金力学性能的影响

变形 Mg-Li 合金的缺点是化学活性较高，在合金熔炼铸造时，由于 Li 容易与空气中氧、氮、氢反应，因此需要在惰性气氛中进行。Mg-Li 合金的耐蚀性低于一般的镁合金，应力腐蚀倾向严重。而在 Mg-Li 合金中加入 Al 等合金元素会进一步降低合金的耐蚀性，这主要是由于原电池作用。采用氟化物阳极氧化处理可以提高 Mg-Li 合金表面耐蚀性，但目前尚无一种好的表面处理方法可以使 Mg-Li 合金经受温度-湿度的循环条件下的抗腐蚀。

6 快速凝固变形镁合金

镁及镁合金在平衡或接近平衡的凝固条件下结晶，微观组织结构和性能存在一些缺点。这些缺点包括：Mg 具有滑移系最少的密排六方（hcp）结构，在室温及温度不太高时不容易产生塑性变形；Mg 具有很弱的电负性，在已知的二元常规镁合金中，有 2/3 的合金的溶质元素在α（Mg）固溶体中的最大固溶度小于 1%（摩尔分数），这使镁合金很难通过冷加工和合金化在保持适当延展性的同时提高合金的强度；Mg 还有很高的化学活性，并且不能像 Al 和 Al 合金那样容易在腐蚀气氛中形成表面防护膜，因而 Mg 和 Mg 合金很容易受腐蚀特别是电化学腐蚀；此外，Mg 还有很高的自扩散系数，这使 Mg 合金中的沉淀相很容易粗化，因而用常规方法生产的镁合金的高温强度等性能较差。因此，虽然 Mg

也有不少的独特优点，如 Mg 比 Al 轻 35.6%，比 Ti 轻 61.5%，是最轻的金属结构材料，而且 Mg 的价格也相对较低，但是长期以来在常规工艺条件下生产镁合金始终没有作为一种主要的工程材料受到重视。

快速凝固技术的出现为改变镁合金的微观组织结构和综合性能创造了条件。与其他快速凝固合金类似，快速凝固也细化了镁合金的晶粒，增加了合金元素的固溶度，明显减少了成分偏析。一般的镁合金快速凝固后晶粒尺寸减少到原来铸态时的 1/16，枝晶臂间距仅为 5～8 μm，经过挤压成形后的晶粒尺寸也只有 3～10 μm，弥散第二相的尺寸仅为约 0.01 μm，晶粒的细化有可能抑制变形过程中孪晶的形成。同时快速凝固使本来很小的溶质固溶度有较大的扩展和形成了许多新的亚稳中间相。快速凝固镁合金微观组织结构上的这些变化使合金的性能有了较大的提高。

6.1 快速凝固工艺开发变形镁合金的原理

(1) 扩展合金元素在镁基体中的固溶度

合金元素在镁中的最大平衡固溶度是决定变形镁合金中添加元素的重要参数，现有数据表明，在平衡状态下，有大约 24 种合金元素在 α (Mg) 固溶体中的最大平衡固溶度超过 1%（摩尔分数），其中又只有 9 种元素具有可能和镁组成工程上有实际应用合金系的潜力。当采用快速凝固技术时，元素在镁中形成固溶体的原子半径差可以扩展到 30% 以内，如图 3.2-2 中粗虚线包括的元素，大幅度丰富了镁合金的合金系。

(2) 晶粒细化提高 Hall-Petch 强化效果和塑性变形能力

多晶体镁的晶粒细化对其屈服强度与延展性改善有巨大作用与潜力。晶粒细化是提高镁及镁合金材料力学性能的重要途径。根据 Hall-Petch 公式 $\sigma=\sigma_0+Kd^{-\frac{1}{2}}$（式中 σ 为多晶体屈服强度，σ_0 为单晶体强度，K 为常数，d 为晶粒尺寸），比较镁与铝在 Hall-Petch 公式作用下的规律（图 3.4-11），可见晶粒细化对镁合金力学性能的提高，其潜力远远大于铝合金。

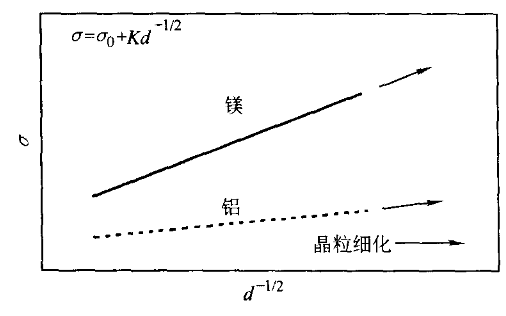


图 3.4-11　晶粒尺寸对镁和铝强度的影响

晶粒细化降低晶界的反向应力从而使相邻晶粒更易发生滑动或转动，并改善疲劳抗力，使镁的变形能力获得明显提高。纯镁的晶粒尺寸细化到 8 μm 以下时，其延展性转变温度可降至室温（图 3.4-12）。若采用适当合金化并细化镁的晶粒尺寸到 1 μm，此时可产生新的变形机制，导致晶界滑动及室温下新的流变过程，在室温下亦具有超塑性，其伸长率可达到 1 000%。用快速凝固工艺获得的新型微晶镁及镁合金材料晶粒尺寸处于 0.1～1 μm 之间，同时有许多热稳定的弥散相阻碍晶粒的长大，可使其具有轻合金材料中最好的塑性和超塑性。

(3) 多相弥散体系提高综合性能

工程应用的快速凝固镁合金共同特征是高体积分数的沉淀相和弥散相，这些相分布在枝晶网胞及晶界上或均匀分布在细化了的基体晶粒中。在快速凝固镁合金具有的尺寸在 0.3～0.5 μm 的等轴 α (Mg) 晶粒中，含有尺寸约为 0.01～0.1 μm 的均匀弥散第二相，在一个尺寸约为 0.5 μm 的晶粒内可以大约分布 10^{11} 质点/mm³，一般小尺寸的弥散相在晶内而大尺寸的相则集中在晶界，这些质点可以有效地钉扎位错和晶界，产生有效的强化。快速凝固工艺制备的镁合金中第二相的尺寸比常规铸锭冶金工艺制备的合金小一个数量级以上，并且由于有更多更具热稳定性的合金元素的加入，使这些弥散相的长大速率非常低，可以在更高的温度下满足使用要求。

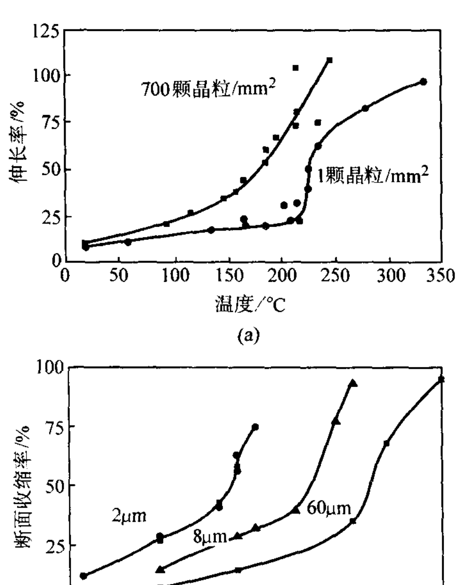
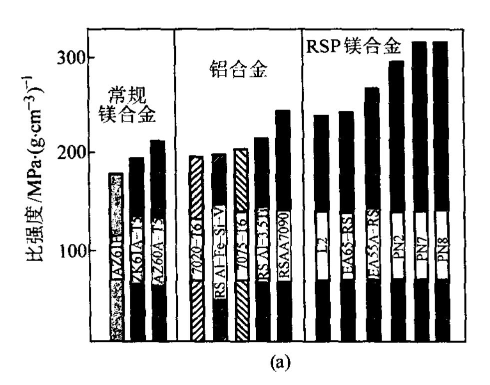


图 3.4-12　晶粒尺寸对镁的塑性的影响



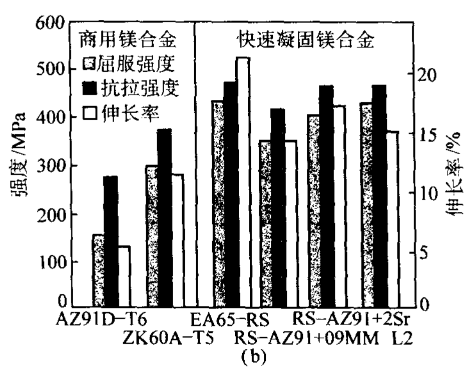


图 3.4-13　快速凝固镁合金与其他轻质变形合金性能比较

(4)"干净"的晶粒提高耐腐蚀性能

用常规工艺对变形镁合金进行合金化的基本目的是细化合金显微组织，提高镁合金力学性能及热稳定性。但加入的合金化元素可能和镁基体形成微电池，造成镁合金组织的耐蚀性降低。而且大多数合金化组元分配系数小于1，在采用常规铸造方法生产时，这些合金化元素有在晶界重新分布的倾向，使这种原电池腐蚀作用加剧，工程镁合金中许多的腐蚀就是这种微电池的活化物作用造成的。快速凝固使显微组织细化（<1 μm），不仅比常规合金化更有效细化晶粒，还有更高的化学均匀性，避免常规合金化工艺带来的有害的和无法预测的微电池现象，使快速凝固镁合金的腐蚀速率比常规铸锭冶金工艺生产的镁合金降低1~2个数量级。

总之，快速凝固工艺可以制备出性能非常优良的变形镁合金，迄今已报道过的综合性能最好的镁合金材料就是采用快速凝固工艺生产的。与常规工业镁合金及现有铝合金比较，快速凝固镁合金材料具有以下特点：

1）室温比强度超过常规铸锭冶金工艺生产的镁合金，其比强度比铝合金的比强度高40%~60%（如图3.4-13）；

2）抗压强度和抗拉强度的比值由0.7增加到1.1以上，改变了普通变形镁合金 $\sigma_{压} < \sigma_{拉}$ 的特性；

3）快速凝固镁合金比屈服强度超过铸锭冶金产品及铝合金相应值，拉伸时超过52%~98%，压缩时超过45%~230%；

4）挤压态制品的伸长率在5%~15%的范围内，形变热处理后可达22%，相应强度值仍高于铸锭冶金镁合金的强度；

5）快速凝固镁合金的大气腐蚀行为与新型高纯常规镁合金AZ91E及WE43和铝合金2024-T6相当，比其他镁合金腐蚀速率小将近2个数量级；

6）与其他轻合金比较，快速凝固镁合金在100℃以上的温度下具有优良的塑性变形行为和超塑性，且由于明显的晶粒细化效果，使其疲劳抗力为铸锭冶金镁合金的两倍；

7）快速凝固镁合金与 SiC_P 等增强相的相容性已得到证实，因此快速凝固镁合金是复合材料的优秀载体。

6.2 变形镁合金快速凝固工艺及其典型合金性能

快速凝固工艺开发和生产商业镁合金集中在两个发展阶段：第一阶段是从1950~1960年，由Dow Chemical Co.采用气体雾化法和旋转冷却盘法进行的研究开发工作；第二阶段是从1984年至现在，由Allied Signal公司开发的平面流法（PFC）生产的快速凝固合金材料。

Allied Signal公司以实验室及试生产规模制取了快速凝固Mg-Al-Zn系EA55合金，该合金的主要性能见表3.4-15。其代表性能为：挤压制品的拉伸屈服强度343 MPa，压缩屈服强度384 MPa，极限抗拉强度423 MPa，伸长率13%，腐蚀速率大约0.25 mm/a，此外，EA55合金在300℃时还具有436%的超塑性，其性能绝对值、相对值均高于许多先进的轻质变形合金材料。

PFC工艺是采用一矩形缝状孔铸造喷嘴紧靠在旋转冷却轮上，用一股惰性气体流使旋转冷却轮上的金属熔池稳定，从而获得熔体旋铸的薄带。此工艺可获得厚25 μm，平均宽度50 mm的连续薄带，之后将薄带研磨粉碎再用传统粉末冶金及加工工艺获得需要的制品，这些制品可以是挤压的圆棒或型材，直径厚度30~100 mm，长数米，并可进一步轧制成板材或锻造成复杂的锻件。PFC技术不限制该工艺的生产能力和生产率，该工艺制造的快速凝固镁合金正准备应用于民用及军用飞机和汽车上，以促进变形镁合金产品的大规模应用。

表3.4-15 Allied Signal开发的快速凝固EA55A合金的典型性能

状态	腐蚀/mm·a⁻¹	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$
挤压棒（实验室）	0.25	469~483	428~434	10~14	6
挤压棒	0.25	474~482	400~415	12~14	6~8
挤压+T4	0.25	415~434	371~406	14.7~24.5	9~15
轧制	0.25	490~538	490~504	4~6	7
320℃+2 h处理	0.25	407	304	14	—

将快速凝固技术应用在实用性最强的AZ91合金上时，可以使合金的屈服强度提高106%，达到457 MPa，使合金的抗拉强度提高65%，达到517 MPa，同时还使伸长率从8.7%提高到20%以上，显微组织细小，在200℃保温24 h不发生明显变化。在AZ91合金基础上加入Ca、Sr或稀土元素制造的快速凝固合金，可以生成热稳定性很高的 Al_aX_b 弥散相（X代表Ca、Sr、RE），这些弥散相分布在晶内和晶间钉扎位错和晶界，抑制蠕变和晶界滑动，合金的显微组织在350℃下暴露24 h不发生改变，而合金的力学性能有进一步的提高，抗拉强度提高到575 MPa，屈服强度提高到542 MPa。合金的腐蚀速率获得进一步提高，仅为0.2~0.6 mm/a，与铝合金A380耐蚀性相当。这些优点使采用该方法生产的快速凝固镁合金在宇航及航空方面具有高度的吸引力。

喷射成形是有价值的快速凝固技术，是介于粉末冶金和传统熔铸工艺之间的锭坯一次成形的快速凝固技术，吸收了两者的优点，很大程度上克服了两种工艺的缺点。喷射沉积工艺简化了用模冷、熔体旋转等工艺制造的快速凝固镁合金所需要的大量工序，含有最低程度的快速凝固工艺的污染物，如氧化物，因此，与常规铸锭冶金工艺比较，材料的断裂韧度 K_{IC} 有明显的改善，同时其他力学性能（强度和塑性）和电化学性能亦有相当大的提高。

喷射沉积的Mg-7Al-4.5Ca-1.5Zn-1.0RE及Mg-8.5Al-2Ca-

表3.4-16 气体雾化（GA）及喷射成形（LDC&SF）的镁基工程合金

方法及合金	腐蚀/mm·a⁻¹	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$
LDC Mg-8.4Al-0.2Zr（205℃+20 h）	—	351	253	18	—
LDC Mg-5.6Zn-0.3Zr（130℃+48 h）	—	354	303	14	—

续表 3.4-16

方法及合金	腐蚀 /mm·a^{-1}	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 /%	K_{IC} /MPa·m$^{1/2}$
SF Mg-7Al-1.5Zn-4.5Ca-1.0RE	0.46	480	435	5	30
SF Mg-8.5Al-0.6Zn-2Ca-0.2Mn	0.15	365	305	9.5	35
SF QE22	3.3	350	290	10	—
Ga Mg-3.2Nd-1.1Pr-1.5Mn	0.28	472	420	5.1	—
Ga AZ91	—	400	350	10	—
Ga ZE63	—	430	410	4	—
Ga ZK60 T6	—	403	376	17	—
Ga QE22	—	415	380	4	—
Ga Mg-7.9Al-0.7Si	14.7	405	291	19	—

0.6Zn-0.2Mn 合金的断裂韧度分别为 30 MPa·m$^{1/2}$ 及 35 MPa·m$^{1/2}$，这些合金的抗拉强度（屈服强度）分别为 480（435）MPa 及 365（305）MPa，断裂伸长率分别为 5% 及 9.5%。相应的显微组织由尺寸为 3 ~ 25 μm 的晶粒及优先在晶界沉淀的 $Mg_{17}Al_{12}$，Al_2Ca，MgRE 及 AlRE 相组成。与铸锭冶金工艺制备的 ZK60 合金挤压及时效态以及 AZ80 合金比较，喷射沉积 Mg-5.6Zn-0.3Zr 及 Mg-8.4Al-0.2Zr 合金在不牺牲强度的条件下得到了更好的伸长率。喷射沉积的 Mg-Al-Zr 合金甚至在 413℃、5 h 固溶处理并在 205℃、20 h 时效后未发现再结晶及晶粒粗化现象，这是由于存在更稳定的沉淀相如 Al_3Zr 之故。喷射沉积的镁合金 QE22 与相应的铸锭冶金合金比较，强度提高 40%，延展性增加（从 3% 提高到 10%），耐蚀性提高 1/3。

快速凝固技术还可以用来开发 Mg-Li 合金，克服 Li 在密排六方的 α（Mg）中的低的强化效果，在（α + β）及体心立方 β（Mg）合金中降低含 Li 量时合金软化，提高 Al、Zn、Ag 等合金元素在镁中的过时效抗力、蠕变抗力、应力腐蚀抗力、大气腐蚀抗力和晶内脆化抗力等性能。

超高强度的非晶镁结构和过饱和 α（Mg）固溶体具有超高耐蚀性是开发快速凝固亚稳态镁合金的重要方面。镁具有很强的形成非晶态长程有序亚稳合金的能力，熔体旋铸的 $Mg_{70}Zn_{30}$ 薄带可达到 840 MPa 的抗拉强度值，是目前最强的商用变形镁合金相应值的两倍。易形成金属玻璃的是 Mg-Ni 和 Mg-Cu 二元系，在其中加入如 Ag、Zn、Al、Sn、Pb、Sb 及 Ca 等可以获得更广泛的玻璃生成范围，这些三元或四元镁基玻璃的抗拉强度值超过 1 000 MPa，具有非常优秀的综合性能。

通过固态镁基混合物进行机械合金化可以进一步改善非晶态镁合金的热稳定性，将预合金化的 Mg-54% Zn 和 Mg-Al-Ca 合金粉末进行机械合金化可以获得固态非晶化镁合金。高能球磨制得的 WE54 +（3 ~ 9）% Al_2O_3 非晶粉末的晶化温度可达 500 ~ 600℃，具有很好的热稳定性能。

7 镁合金的超塑性变形

利用镁合金及其复合材料的超塑性进行塑性变形，是开发变形镁合金新合金、新工艺的重要途径。镁虽然呈密排六方的晶体结构，但很多镁合金材料表现出明显的超塑性，甚至在较低温度、较大晶粒尺寸和较大应变速率条件下都具有良好的超塑性。即镁合金具有高应变速率超塑性和较大尺寸晶粒的超塑性。一些典型的超塑性镁合金研究情况见表 3.4-17 和图 3.4-14 ~ 图 3.4-16。

表 3.4-17 典型镁合金的超塑性能

合金	晶粒尺寸 /μm	温度 /K	T/T_m	应变速率 /s^{-1}	应力 /MPa	伸长率 /%	m 值
M1A	0.3	453	0.49	5×10^{-4}	33	> 150	0.38
EA55RS	—	473	0.51	1×10^{-4}	—	270	—
AZ91	0.5	473	0.51	6.2×10^{-5}	25	661	0.5
AZ91	1	543	0.59	1×10^{-3}	16.9	190	0.5
AZ91	1.2	523	0.57	3.3×10^{-3}	—	> 500	0.52
AZ91	4.1	523	0.57	3.2×10^{-3}	11.5	425	0.5
ZK60	2.2	523	0.57	1×10^{-3}	31.4	450	0.5
ZK60	3.4	423	0.46	1×10^{-5}	66	340	0.3
ZK60	3.7	523	0.57	1.1×10^{-4}	8.4	680	0.55
ZK60	6.5	498	0.54	1×10^{-5}	13	449	0.5
ZK60	0.65	473	0.51	1×10^{-3}	21.7	659	0.5
ZK61	1.2	523	0.57	1×10^{-2}	24.7	350	0.5

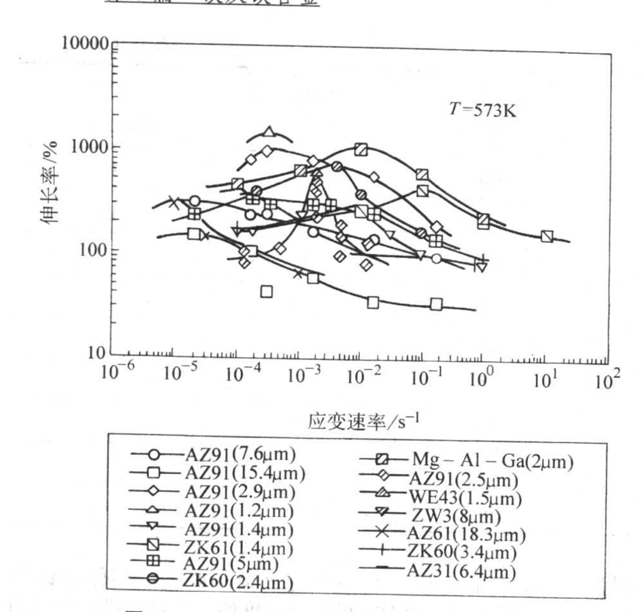


图 3.4-14 573K 温度下镁合金的典型超塑性

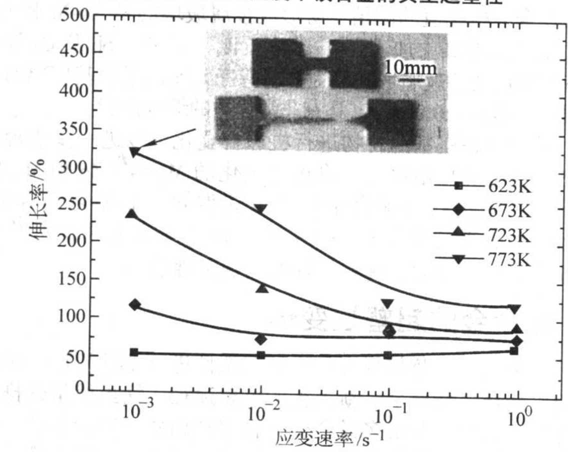
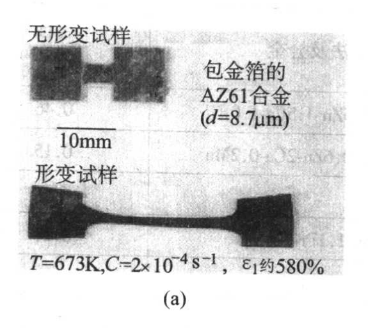
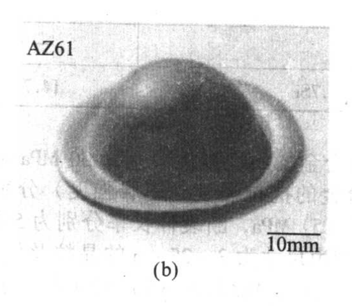


图 3.4-15 AZ31 镁合金超塑性性能与应变速率、温度之间关系



(a)



(b)

图 3.4-16 AZ61 镁合金超塑成形试样及零件

编写：余 琨（中南大学）
审稿：田荣璋（中南大学）

第5章 镁的腐蚀与保护

1 镁的化学特性

镁的价电子层结构为3 s^2；第一电离能和第二电离能分别为：742 kJ/mol、1 460 kJ/mol，电负性为1.31；标准电极电位为-2.37 V（$Mg^{2+}+2e \rightarrow Mg$）和-2.69 V［$Mg^{2+}(OH)_2+2e \rightarrow Mg(s)+2OH^-$］。镁的化学性质非常活泼。

镁的腐蚀电位依介质而异，一般在+0.5～-1.65 V之间（表3.5-1）。在自然环境中，镁的腐蚀电位约为-1.0～-1.5 V。在水溶液中的腐蚀电位约为-1.0 V，所以在中性或弱碱性溶液中，镁及其合金都会发生氢去极化反应，析出氢气。

镁很容易钝化，其钝化性能仅次于铝。但是，镁的氧化膜比较疏松，镁及镁合金的耐蚀性差。

表3.5-1 镁在不同介质中的稳定电位

介　质	稳定电位 E_R（Vs NHE）/V
氯化钠（NaCl）	-1.72
硫酸钠（Na_2SO_4）	-1.75
铬酸钠（Na_2CrO_4）	-0.96
盐酸（HCl）	-1.68
硝酸（HNO_3）	-1.49
氢氧化钠（NaOH）	-1.47
氨（NH_3）	-1.43
氢氧化钙（$Ca(OH)_2$）	-0.95
氢氧化钡（$Ba(OH)_2$）	-0.88

2 镁的腐蚀类型

镁及镁合金的腐蚀类型包括：化学腐蚀（高温氧化）、电化学腐蚀（电偶腐蚀、点腐蚀、应力腐蚀和腐蚀疲劳等局部腐蚀）。

2.1 钝化行为

在中性或碱性的水溶液中，镁合金表面易形成$Mg(OH)_2$钝化层。化学反应式如下：

$$2H_2O+2e^- \longrightarrow H_2+2OH^-$$

$$Mg^{2+}+2OH^- \longrightarrow Mg(OH)_2$$

镁的钝化膜，在pH值小于11.5的水溶液中，一方面由于钝化膜自身的热力学稳定性不高，另一方面，由于$Mg(OH)_2$薄膜存在很大的结构内应力，容易产生裂纹或破坏，当镁暴露在空气或水中时，即发生腐蚀。在腐蚀过程中同时由于氢气的产生，并由此引起更深层钝化膜破裂。因此，镁和镁合金的钝化膜在pH值小于11.5的水溶液中是不稳定的，易发生各种形式的腐蚀，对基体金属基本没有保护作用。

在pH值大于11.5的纯碱性水溶液中，钝化膜层的裂纹被产生的腐蚀产物$MgCO_3$、$Mg(OH)_2$所填充而变得稳定，所以具有耐腐蚀性能（如图3.5-1）。

在含有氯离子、氟离子、碳酸根离子、硫氰根离子、硫酸根离子和硝酸根离子等阴离子的水溶液中，$Mg(OH)_2$层易被破坏，加速镁的腐蚀。

2.2 化学腐蚀

室温下，Mg与干燥空气中的氧气直接反应，在金属表面形成疏松的氧化膜。熔融Mg在空气中能剧烈燃烧。在300℃时，能与氮气发生反应，生成Mg_3N_2。在空气中，在600℃时，与空气中的氮发生反应，生成氮化镁（Mg_3N_2），与NH_3反应生成氮化镁（Mg_3N_2）。在大气压力下，镁与氢反应，生成氢化镁（MgH_2），当温度大于280℃，MgH_2分解，放出氢气。常温常压下，100 g镁中能溶解20 cm^3氢气。

镁在一氧化碳中燃烧，生成氧化镁和单质碳。

镁在低温下能和二氧化碳缓慢反应，生产碳化镁（MgC_2）和一氧化碳；在加热的条件下，镁在二氧化碳中能剧烈燃烧，生成氧化镁（MgO）和单质碳。

在450℃以下干燥的氧气中，生成P-B比（生成的金属氧化膜体积/生成这些金属氧化膜所消耗的金属体积）约为1的氧化物膜，具有保护作用；但当Mg在450℃以上被氧化时，形成的MgO膜的P-B比少于1（0.81），没有保护作用。

在含硫的气氛中，镁合金表面的氧化膜具有较好的保护性。因此，在镁合金高温熔炼、铸造过程中，常常使用SO_2或SF_6气体作为镁合金的保护性气体，防止镁合金的氧化。

在多元镁合金中，少量杂质的存在影响氧化膜的结构和形貌。一般随着温度升高，合金中杂质的活性增加，其腐蚀速率的增加要比纯镁相对静态的腐蚀速率大得多。因此高温下，镁合金活性增加，氧化速度加快。

Mg-RE系合金及添加微量铍（0.001%）的镁合金，高温下氧化生成致密的氧化物膜，具有很好的抗高温氧化能力。

2.3 小孔腐蚀

镁虽是一种自钝性很强的金属，但其生成的钝化膜是疏松多孔的。当镁及镁合金在含有离子半径小、活性大的阴离子（如Cl^-）溶液中，氯离子从膜的缺陷处通过位错区、晶界区等渗进去，并优先吸附在钝化膜上，使组成膜的氧化物变成可溶性的镁盐：

$$Mg(H_2O)_m+xCl^- \rightarrow (MgCl_x^{-x})+mH_2O$$

吸附的Cl^-进入晶格，代替膜中的水分子、OH^-或O^{2-}，并占住了它们的位置。吸附Cl^-以后，由于负电荷的场作用，影响电极反应的活化能，加速金属镁的溶解。同时在膜受到破坏的地方，露出的金属便成为活化-钝化原电池的阳极。由于活化区小而钝化区大，构成一个大阴极、小阳极的活化-钝化原电池。在腐蚀坑的上部由于氧的浓度较大，使镁钝化，成为阴极，而腐蚀坑的下部则为阳极，使得镁的腐蚀不断向深处发展，直至材料穿孔。

多相镁合金，容易析出阴极性的第二相，如$Mg_{17}Al_{12}$沉淀物，与镁基体阳极构成微观腐蚀原电池，因而多相镁合金易发生小孔腐蚀。

在中性或碱性盐溶液中也易发生小孔腐蚀，重金属污染物能加速镁合金的小孔腐蚀。

2.4 电偶腐蚀

镁与铁、铜、铝、镍等金属工程结构材料相比是电位最负的金属（见表3.5-2），通常作为原电池中的阳极。电化学腐蚀是镁和镁合金最易发生的腐蚀，造成镁和镁合金电化学腐蚀通常有以下两个因素。

1）镁合金中通常含有重金属元素，尤其是Fe、Cu、Ni、Co等有害杂质元素。这些电极电位很正的阴极性杂质，与镁基体阳极形成短路的微观原电池，产生内电偶腐蚀。

2）镁与电极电位很正的异种金属接触，构成宏观原电池，产生外电偶腐蚀；如与钢、铜合金和镍合金等金属接触。表3.5-2列举了常用金属的标准电极电位，表3.5-3列出了部分常用金属在3%～6% NaCl溶液中的自腐蚀电位。镁发生电偶腐蚀的机理可用下列反应表示：

阳极（镁）：　$Mg \longrightarrow Mg^{2+} + 2e^-$

阴极（杂质或异种金属）：　$2H_2O + 2e^- \longrightarrow H_2 + 2OH^-$

次生反应：　$Mg^{2+} + 2OH^- \longrightarrow Mg(OH)_2$

$Mg(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow MgCO_3 + H_2O$

表3.5-2　常用金属的标准电极电位

电　极	电极反应	电位/V
Li，Li^+	$Li^+ + e^- \rightarrow Li$	-3.02
K，K^+	$K^+ + e^- \rightarrow K$	-2.92
Na，Na^+	$Na^+ + e^- \rightarrow Na$	-2.71
Mg，Mg^{2+}	$Mg^{2+} + 2e^- \rightarrow Mg$	-2.37
Al，Al^{3+}	$Al^{3+} + 3e^- \rightarrow Al$	-1.71
Zn，Zn^{2+}	$Zn^{2+} + 2e^- \rightarrow Zn$	-0.76
Fe，Fe^{2+}	$Fe^{2+} + 2e^- \rightarrow Fe$	-0.44
Cd，Cd^{2+}	$Cd^{2+} + 2e^- \rightarrow Cd$	-0.40
Ni，Ni^{2+}	$Ni^{2+} + 2e^- \rightarrow Ni$	-0.24
Sn，Sn^{2+}	$Sn^{2+} + 2e^- \rightarrow Sn$	-0.14
Cu，Cu^{2+}	$Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$	0.34
Ag，Ag^+	$Ag^+ + e^- \rightarrow Ag$	0.80

表3.5-3　一些常用金属材料在3%～6%NaCl溶液中的自腐蚀电位

金属材料	电位/V	金属材料	电位/V
Mg	-1.73	镀锌钢	-1.14
Mg合金	-1.67	镀镉钢	-0.86
AlSi12	-0.83	钢	-0.78
黄铜（60/40）	-0.33	铸铁	-0.78
Cu	-0.22	铬钢（活化化）	-0.43
Ni	-0.14	铬钢（钝态）	-0.13

2.5　其他腐蚀形式

镁及镁合金晶界和第二相，相对于基体来说几乎总是阴极，镁合金一般不发生晶间腐蚀。同时，镁合金的腐蚀相对于氧浓度差不敏感，镁合金一般不发生缝隙腐蚀。有保护性涂层和阳极氧化膜的镁合金易发生丝状腐蚀，如AZ91合金腐蚀的初期阶段是以丝状腐蚀和点腐蚀为特征。没有涂层的纯镁一般不发生丝状腐蚀，

3　影响镁和镁合金腐蚀的因素

镁和镁合金耐蚀性与其纯度、杂质和合金元素种类以及热处理工艺有关。

3.1　杂质对镁和镁合金耐蚀性的影响

杂质主要是以活性阴极相存在，通过微观原电池腐蚀形式和破坏镁的钝化膜层的结构影响镁和镁合金耐蚀性能；

杂质对镁和镁合金耐蚀性的影响可以分为三类：

第一类为无害元素，如Na、Si、Pb、Sn、Mn、Al以及Be、Ce、Pr、Th、Y和Zr等元素，对镁和镁合金的腐蚀几乎没有影响；

第二类为有害元素，如Fe、Ni、Cu和Co等，降低镁和镁合金的耐腐蚀性能；

第三类为介于两者之间的元素，如Ca、Zn、Cd、Ag等，对镁和镁合金的耐腐蚀性能影响较小。如图3.5-1、图3.5-2所示。

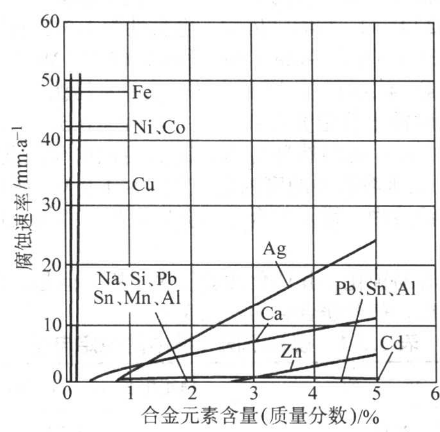


图3.5-1　合金元素含量对二元镁基合金在3%NaCl溶液中腐蚀速率的影响

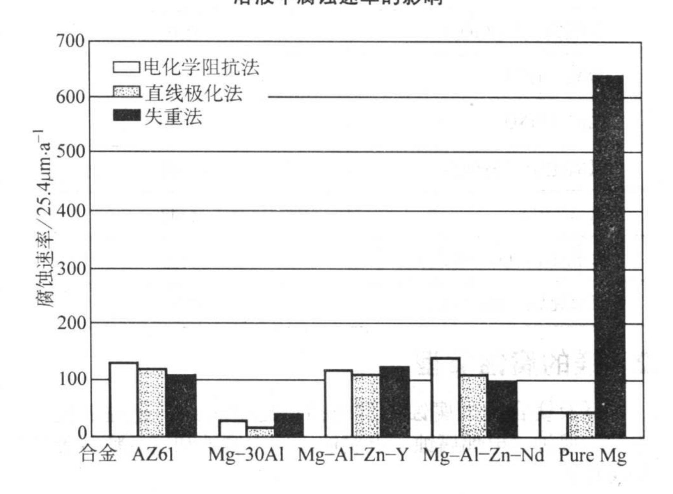


图3.5-2　不同成分的镁合金在pH值为9.2的硼酸钠溶液中的腐蚀速率

3.2　热处理、晶粒大小和冷加工对镁耐蚀性的影响

热处理和时效温度对镁合金的耐蚀性有很大的影响。热处理对镁合金耐蚀性的影响主要是通过析出相和晶粒大小来影响。凡是导致析出金属间化合物和晶粒粗化的热处理工艺，都会降低镁合金耐蚀性。如Mg-1.8Nd-4.53Ag-4.8Pb-3.83Y固溶体型合金，固溶态比铸态具有较高的耐蚀性。但时效处理后，由于析出弥散的阴极相反而使合金耐蚀性变得比铸态的低。

经过固溶处理后使第二相不能完全溶解的合金，如Mg-5.39Sn-8.5Li-5.0La合金，反而使第二相更加分散，其耐蚀性较铸态合金的耐蚀性差；如再进行时效处理，耐蚀性将进一步降低。时效温度对某些镁合金腐蚀的腐蚀速率的影响如图3.5-3所示。

冷加工对镁合金的应力腐蚀敏感性的影响很复杂，其机理目前还不清楚。但是，冷变形，如冷拉、冷轧等虽然引入残留内应力，一般情况下，镁合金应力腐蚀敏感性反而降低。

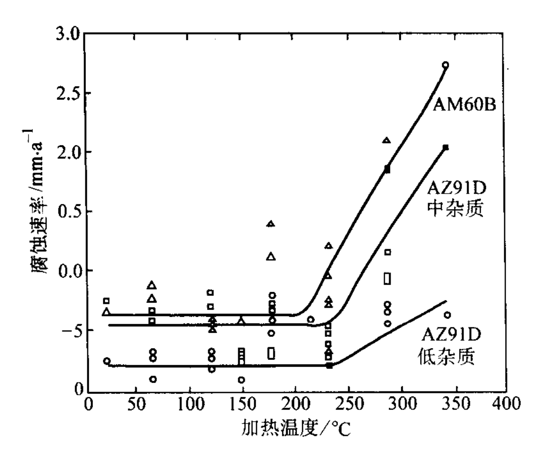


图 3.5-3 时效温度对 AZ91D 和 AM60B 盐雾腐蚀速率的影响

3.3 环境因素

1) 介质 pH 值的影响 镁合金在氢去极化腐蚀与氧去极化腐蚀过程中，介质 pH 值的大小直接影响镁的平衡电位值（常温下）：$E_{H/H^+} = -0.059pH - 0.0295\ lgP_{H_2}$。随着 pH 值的减小（酸性增强），氢去极化电位升高，腐蚀电流增加，腐蚀速度加快。当 pH 值增大（碱性增强）时，镁的表面逐渐形成氧化物膜，腐蚀速度降低，当 pH 值大于 11.5 时，镁具有很好的耐腐蚀性能（如图 3.5-4）。

2) 环境介质的成分及浓度的影响 镁在绝大多数的无机酸和有机酸以及中性介质中，都是不耐腐蚀的，而且腐蚀速度一般都很大。但铬酸、磷酸和氢氟酸除外，镁在铬酸中处于钝化状态，镁在磷酸或氢氟酸中生成溶解度很小的磷酸盐和 MgF_2 保护膜，且其耐蚀性随 H_3PO_4、HF 浓度的增加而增强。

在碱性溶液中，由于生成难溶的 Mg $(OH)_2$ 膜而非常耐蚀。如镁合金在 40%NaOH 溶液中放置 1 h，几乎不发生任何腐蚀，在 NaOH 稀溶液中即使温度达到沸点，镁也很难被腐蚀。

在盐类溶液中，镁的腐蚀特性与盐的性质有关，如表 3.5-4、表 3.5-5 所示。在含有 $S_2O_6^{2-}$、Cl^-、SO_4^{2-} 等非氧化性的盐类溶液中，腐蚀速率较大，且腐蚀速率随盐浓度的增加而增加；在含有 SiO_3^{2-}、CrO_4^{2-}、$Cr_2O_7^{2-}$、PO_4^{3-} 等的盐溶液中，能形成保护性的膜，腐蚀速率较小。

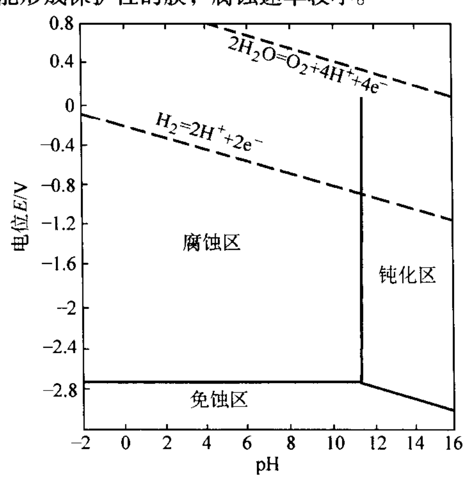


图 3.5-4 Mg-H_2O 系的 E-pH 图（25℃）

在许多有机介质如甲醚、乙醚、丙酮、石油、汽油、煤油和芳香族化合物中稳定，不腐蚀。

镁在大气中腐蚀的阴极过程主要是氧的去极化（与在溶液中不同）过程。纯镁在大气中的耐蚀性取决于大气的湿度及其污染程度，腐蚀速率随湿度的增加而增加，湿度超过 90%，腐蚀速度将显著增大；污染的大气，如大气中含有硫化物和氯化物等，会促进镁的腐蚀。镁在工业大气和海洋大气中耐蚀性较差。但镁在干燥的空气中不腐蚀。

3) 介质流速、温度的影响 一般随腐蚀介质流速增加，由于表面腐蚀产物减少，电阻降低，镁和镁合金的腐蚀速度增加。随腐蚀介质温度的升高，电解质溶液电阻降低，导电性增强，氢的去极化反应的阴极过程加速和腐蚀电位正移，

表 3.5-4 商业纯镁在各种盐溶液中的腐蚀速度 mg·(dm²·d)⁻¹

酸性盐	腐蚀速度	中性盐	腐蚀速度	碱性盐	腐蚀速度
Al_2 (SO_4)	112	NaCl	14	Na_2SiO_3	0.7
$ZnCl_2$	770	NaBr	6	Na_2SO_3	2
NaH_2PO_4	85	NaI	29	$NaBO_2$	5
$NaHC_4H_4O_6$	155	NaF	3	Na_3PO_4	3
		Na_2SO_4	8		
		$NaNO_3$	5		
		氧化性酸的盐			
$(NH_4)_2S_2O_6$	465	Na_2CrO_4	2	Ca $(ClO)_2$	155
$Na_2Cr_2O_7$	4	$NaClO_2$	59	NaClO	5
Fe_2 $(SO_4)_3$	297	$Na_4P_2O_7$	51	$NaIO_3$	40

表 3.5-5 商业纯镁在不同介质中的腐蚀速率

介质	腐蚀速率	
	mm/a	mil/a
潮湿空气	1.0×10^{-5}	0.000 4
凝聚水的潮湿空气	1.5×10^{-2}	0.6
蒸馏水	1.5×10^{-2}	0.6
酸性气氛中的蒸馏水	0.03～0.3	1.2～12
热去离子水（100℃）	16	640
含 0.25MnaF 的热去离子水	5.5×10^{-2}	2.2

续表 3.5-5

介质	腐蚀速率	
	mm/a	mil/a
海水	0.25	10
3M $MgCl_2$ 溶液	300	12 000
3M NaCl 溶液（99.99%Mg）	0.3	12

致钝电流密度提高，镁和镁合金的腐蚀速度加快。

4 镁合金的应力腐蚀与控制

4.1 镁合金的应力腐蚀

镁合金在含有氯离子、硫离子、氯酸根离子等活性阴离子的介质和内应力或者拉应力共同作用下，易发生应力腐蚀开裂。目前认为镁合金易发生应力腐蚀开裂的原因，主要是由于在晶界上析出、对应力敏感的第二相（如 $Mg_{17}Al_{12}$）和镁的氢化物（MgH_2）所致。同时在裂纹尖端由于发生原电池腐蚀产生的 H 与 Mg 作用生成 MgH_2，更增大了对应力腐蚀的敏感性。这一反应过程见图 3.5-5。

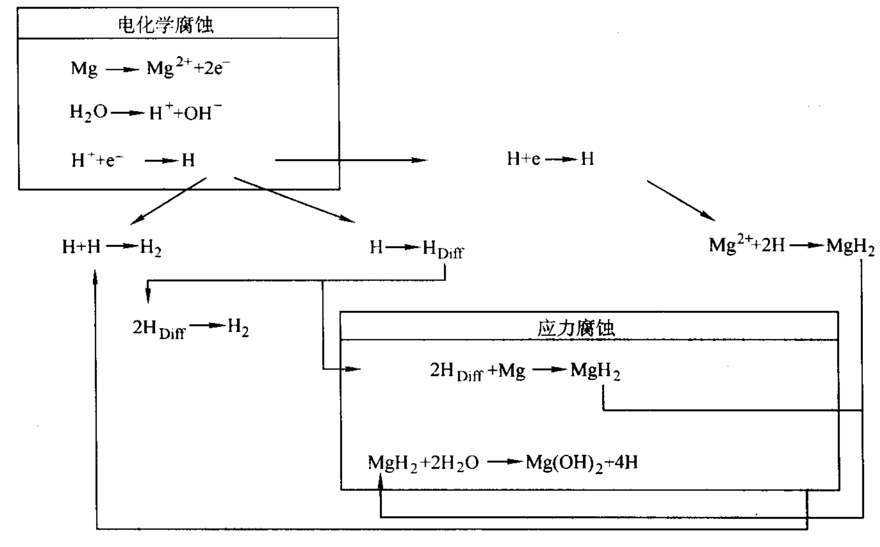


图 3.5-5 镁合金的应力腐蚀应过程

4.2 镁合金应力腐蚀的控制方法

防止镁合金的应力腐蚀开裂的方法有以下几种。

1）选择耐应力腐蚀的镁合金　选择对应力腐蚀不敏感的镁合金或根据使用环境选择耐应力腐蚀的镁合金。如 Mg-Al 合金对应力腐蚀敏感性最大，且敏感性随着铝含量的增加而增加。通常加入 Mn 或 Zn 元素或者降低镁合金中有害杂质 Fe、Cu、Ni 等元素的含量，能有效地减少应力腐蚀的敏感性。Mg-Zn 合金应力腐蚀敏感性居中，不含铝、锌的镁合金可消除应力腐蚀的敏感性。

2）合理设计结构以减小应力　在制造和装配镁合金构件时，如螺栓和铆钉所承受的应力，应尽量使结构具有最小的应力集中系数，并使其与介质接触的部分具有最小的残余应力。对于连续工作的镁合金，控制应力低于极限值（一般为拉伸屈服强度的 30% ~ 50%）。

3）采用低温退火消除应力　残余应力是引起镁合金应力腐蚀的主要原因之一，退火处理可消除残余应力。如冷轧的 Mg-6.5Al-1Zn-0.2Mn合金采用 177℃、8 h 退火后，不影响强度下，但可降低应力腐蚀倾向。如焊接后的变形 Mg-Al 系和 Mg-Zn 系合金，低温退火消除应力，可有效地增加耐应力腐蚀的能力。

4）采用阳极性金属做包覆层　采用相对于基体为阳极性的金属做包覆层，则基体金属为阴极，从而受到保护。例如用 Mg-Mn 合金做 Mg-Al-Zn 合金的包镀层，可以减少对应力腐蚀的敏感性。

5）环境的控制　镁合金产生应力腐蚀开裂的环境主要是大气和水。当水中通入氧（空气）时，会加速镁合金的应力腐蚀，某些阴离子也会加速镁合金的应力腐蚀（如 Cl^-）。镁合金在 0.1 mol/L 的中性盐类溶液中的应力腐蚀开裂敏感性按下列顺序递增：

$$CH_3COONa < NaCl < Na_2CO_3 < NaNO_3 < Na_2SO_4$$

镁合金在氢氧化钠、硝酸、氢氟酸溶液、蒸馏水、NaCl-H_2O_2 溶液、NaCl-K_2CrO_4 溶液、SO_2-CO_2 湿空气、海洋大气中易产生应力腐蚀。

通常控制环境的方法是用有机或非有机涂层或者将镁合金进行阳极氧化处理使镁与腐蚀环境隔开。

6）对镁合金表面进行表面处理。

5 镁合金腐蚀的防护技术

5.1 提高镁合金的纯度

提高镁合金纯度，降低 Mg 合金中的 Fe、Ni、Cu、Co 等阴极相或夹杂物的含量至临界值以下，以减少活性阴极面积，增加阴极极化程度，阻止阴极过程的进行，从而提高镁合金的耐蚀性。杂质对镁和镁合金腐蚀速率的影响可用经验公式表示为：

$$V_{corr} = (0.04Mg - 0.54Al - 0.16Zn - 2.06Mn + 0.24Si + 28Fe + 121.5Ni + 11.7Cu)$$

对于铸造的 AZ91D 合金（压铸）和 AZ91E 中的主要杂质元素容许的极限含量（质量分数），应满足下列关系。

压铸镁合金（快速冷却）：

$(Fe)_{max} = 0.032\%$的 Mn

$(Ni)_{max} = 0.005\%$

$(Cu)_{max} = 0.07\%$

重力铸造(缓慢冷却)：

$(Fe)_{max} = 0.032\%$的 Mn

$(Ni)_{max} = 0.001\%$

$(Cu)_{max} = 0.04\%$

另一方面，镁的标准电极电位很低（-2.37 V），当镁合金与其他金属接触或连接时，易发生电偶腐蚀。镁作为原电池的负极而被严重腐蚀。其腐蚀速度与接触金属的电位差值（$\Delta E = E_{(+)} - E_{(-)}$）有关，一般差值越大，腐蚀越快。因此，镁合金不能直接与铁、铜、镍及其合金或者不锈钢接触或连接。

5.2 添加特殊的合金化元素

加入特殊的合金元素形成优良的钝化膜，阻止电化学腐蚀过程，是提高镁合金的耐腐蚀性能的研究方向，也是镁合金实现工程应用的有效途径。其合金化原则可归纳如下。

1）加入同镁有包晶反应的合金化元素：Mn、Zr、Ti等。但其加入量不应超过固溶度极限。

2）当加入同镁有包晶反应的合金化元素，而且相图上同金属间化合物相毗邻的固溶体相区有着较宽的固溶范围时，例如Mg-Zn，Mg-Al，Mg-In及Mg-Sn，Mg-Nd等合金系，应偏重于选择：①具有最大固溶的第二组元金属，与固溶体相毗邻的化合物以稳定性高者为好；②共晶点尽可能远离相图中镁一端。

3）选用高纯镁（杂质≤0.01%），制造高耐蚀合金。加入的合金元素应尽可能少含杂质。Zr、Ta、Mn能使有害杂质转化成危害性较少的化合物（如（Fe，Mn）Al_3），属于能减少有害杂质影响的合金元素。

例如，WE43和WE54的盐雾腐蚀速率比AZ91C合金低2个数量级，在空气中加热至300℃时，具有极好的抗氧化能力。

Mg-Zr合金和AZ91E系列合金的耐点蚀能力比AZ91C合金好，抗微观原电池腐蚀能力差不多。Mg-Li合金以及加Ca的高温镁合金，可明显改善高温抗氧化性能。

4）加入氢超电压高的合金化元素　合金中加入析氢超电压高的元素，如铅、锌、镉、锡、铋等元素，提高合金的阴极析氢超电压，降低镁合金在腐蚀介质中的腐蚀速度。如AP系合金、AZ系合金中添加铅、锌元素，可使合金的腐蚀速度明显降低。

5.3 快速凝固处理（RSP）

镁合金的快速凝固处理，一方面能增加有害杂质的固溶度极限；另一方面快速凝固能改善材料的微观结构，使镁合金的组织、成分更加均匀，减少局部微电偶电池的活性。同时，快速凝固能增大可以形成玻璃体氧化膜元素的固溶度，促进其更具保护性并有“自愈合能力”的玻璃体膜的形成，提高材料的耐蚀性能。如通过RSP增加镁固溶体中铝的含量，可在镁合金整个表面形成优良的富铝钝化膜。这层有玻璃体结构的膜被击穿后能迅速自我修复，因此具有很好的保护性。而传统的含铝镁合金，铝主要集中在合金中的第二相（$Mg_{17}Al_{12}$），因此合金表面只能局部形成钝化膜，耐蚀性较差。如在Mg-Al-Zn合金中加Mn、Si和稀土（Ce，Nd，Pr和Y）通过快速凝固生产的压铸件，在3%NaCl溶液中比非快速凝固件具有高得多的耐蚀性。快速凝固技术与合金化技术结合，可以制备耐蚀性和力学性能优良的镁合金。

5.4 合理的热处理制度

热处理工艺对镁合金的耐蚀性有很大的影响。凡是能增大金属间化合物固溶度的热处理工艺，可以减少活性阴极或易腐蚀的第二相的面积，提高合金的耐蚀性（Mg-Al合金除外）。凡是导致析出金属间化合物和晶粒粗化的热处理工艺，通常都会降低镁合金耐蚀性（表3.5-6）。例如，Mg-1.8Nd-4.53Ag-4.8Pb-3.83Y固溶体型合金，固溶态比铸态具有较高的耐蚀性。但时效处理后，由于析出弥散的阴极相反而使合金耐蚀性变得比铸态的还低。经过固溶处理后使第二相不能完全溶解的合金，如Mg-5.39Sn-8.5Li-5.0La合金，反而使第二相更加分散，其耐蚀性较铸态的耐蚀性差；如再进行时效处理，耐蚀性将进一步降低。

5.5 镁合金的表面处理

表面处理是提高镁合金耐腐蚀性能、改善外观的最为有效的技术。镁合金表面处理技术，根据工作环境，外观要求，合金成分和组织，需选择不同的表面保护和处理方法。

表3.5-6　第二相粒径大小与热处理状态对AZ91C和AZ91E合金盐雾腐蚀速度的影响

合金	粒径/μm	Mn（质量分数）	Fe（质量分数）	腐蚀速率/mm.a^{-1}			
				F	T4	T5	T6
AZ91C（未处理）	187	0.18%	0.087Mn	18	15	—	15
AZ91C（精炼、晶粒细化）	66	0.16%	0.099Mn	17	18	0.12	15
AZ91E（未处理）	146	0.23%	0.008Mn	0.64	4	0.12	0.15
AZ91E（精炼、晶粒细化）	78	0.26%	0.008Mn	2.2	1.7	0.12	0.12

通常镁合金表面处理的涂层类型有：涂油和涂蜡、化学转化镀层、阳极化涂层、涂料和粉末涂层及金属覆盖层。

镁合金表面处理的工艺流程一般为：清洗（机械清洗和化学清洗，主要是去除表面油污）→预处理（主要是活化表面）→表面处理→清洗→封孔处理。

（1）激光表面处理

激光表面处理是材料表面在高能量激光流的作用下熔化，在纳秒范围内脉冲激光可产生高达10^{10}℃/s的冷却速度，使金属表面进行快速凝固，在合金表面形成亚稳态结构固溶体，使表面合金晶粒细化，减少了阴极相的面积，从而提高镁合金耐蚀性。

通常用作镁合金激光表面处理的金属涂层有：Al、Ca、Cu、Mo、Ni、Si、W、Al+Cu、Al+Mo、Al+Ni和Al+Si等，其中耐腐蚀性最好的是通过Al形成$MgAl_2O_4$尖晶石的镁基铝合金。

1）激光表面重熔　激光表面重熔处理，可以获得均匀细小或非晶的耐蚀性组织，提高镁合金的耐蚀性能。如用KrF激光处理AZ31B合金，用Nd：YAG激光处理AZ91D和AM60B的Mg-Al-Zn系合金，耐蚀性有较大提高。

2）激光表面合金化　激光表面合金化，可以在镁合金表面制备高耐蚀性的合金层，如R Galun采用了铝、铜、镍和硅等元素，使用5 kW CO_2激光器进行表面合金化，激光改性层的厚度为700～1 200 μm，表面硬度为250HV，表面合金层合金元素含量达15%～55%，使其在盐雾中的腐蚀速度大大提高。

3）激光熔敷（又称激光涂敷）　激光熔敷即在合金表面涂敷一层耐蚀性的金属涂层，提高镁合金的耐蚀性。如纯镁表面激光熔敷Mg-Al合金层，改性合金层的组成相为α（Al）和β（Mg_5Al_8），界面上生成共晶层，与纯镁相比，激光改性层的腐蚀电位正移了约0.7 V，钝化区间加大，耐蚀性能优于纯镁。如AZ91C合金表面涂上100 nm厚的Al、Cr或Ni薄层，进行退火处理后，在AZ91C合金表面均匀形成了一层合金和玻璃态的混合氧化物。如经激光处理的涂Al的AZ91C合金，在合金表面生成了$Mg_{17}Al_{12}$和玻璃态的$MgAl_2O_4$，大大提高了AZ91C合金的耐蚀性，在含氯化钠的硼酸-硼酸盐

溶液中，击穿电位正移600 mV，同时由于激光处理使合金表面形成压应力，提高了合金的抗疲劳腐蚀能力。真空条件下，ZK60 /SiC镁基复合材料表面激光涂敷铝合金层，材料的腐蚀电位明显提高。Mg/SiC复合材料进行表面激光涂敷$Cu_{60}Zn_{40}$后，涂敷层$Cu_{60}Zn_{40}$与Mg/SiC基体结合良好，材料的腐蚀电位（Ecorr）比未处理时提高3.7陪。

(2) 气相沉积

利用物理气相沉积（PVD）、化学气相沉积（CVD）和等离子束辅助沉积（IBAD）等技术，可以获得具有一定耐蚀性的防护膜层。F.Stippich用高能Ar^+（15KeV）轰击高纯MgO使其蒸发后在基体表面上沉积，在AZ91等合金表面形成硬度高、空隙率低、附着力好、部分晶化、具有优良耐蚀性的光滑MgO膜。

气相沉积涂层材料选择原则有：①可提高电位的元素；②可用作牺牲阳极的元素；③可形成具有耐蚀性的薄膜（如尖晶石结构）的元素。常用的涂层材料有：Al、Cr、Mn、V、Ti等，此外，玻璃搪瓷也可以用于镁合金的防护和装饰。

(3) 离子注入技术

离子注入技术是将一高能离子在真空条件下加速注入固体表面的方法，该方法可以注入任何离子。离子注入的深度与离子的能量和靶的状态有关，一般为50~500 nm。注入的离子在固溶体中处于置换或间隙位置，形成非平衡相的均匀组织表面层，提高合金的耐蚀性。离子注入的优点是可在表面形成新的合金层，改变表面状态，解决了其他工艺制备的涂层表面与基体的结合强度问题。离子注入提高合金的耐蚀性与注入离子的种类有关。如在镁合金表面注入耐蚀元素Cr，可提高合金的耐蚀性；在纯镁表面注入硼，可使Mg的开路电位正移200 mV，扩大钝化区电位范围，降低临界钝化电流密度。在AZ91C合金表面注入硼，虽不改变开路电位，但可降低维钝电流密度，提高合金的耐蚀性。

(4) 保护膜与涂层处理

化学转化膜和电化学氧化以及金属表面涂覆等工艺，是提高镁合金防蚀性能最常用最有效的防护方法。通过表面处理后可在镁合金表面形成一层致密的保护膜或涂层，以增强镁合金的耐蚀性能。

镁合金表面的保护膜与涂层处理，通常采用的方法有：化学转化、阳极氧化、有机涂装与金属镀层保护。涂层方法和防护效果，可以根据其服役环境和处理成本进行选择。

1) 化学转化膜处理　化学转化膜法也称为化学氧化法，是使金属工件表面与处理液发生化学反应，生成一层保护性钝化膜，比自然形成的保护膜有更好的保护效果。同阳极氧化膜相比，化学转化膜比较薄（0.5~3 μm），硬度和耐腐蚀性稍低，适用于在特定的环境下的防护，如运输和储存过程中镁的防护、镁合金机械加工表面后的长期防护。同时化学转化膜处理工艺具有设备简单、投资少、处理成本低等优点。但是在恶劣环境下工作的镁合金部件，化学转化处理必须和其他保护方法联合使用。

镁合金的化学转化膜处理，常用的成膜剂有两大类：一类是铬酸盐成膜剂，另一类是磷酸盐成膜剂，常用镁合金化学转化膜处理方法及特点如表3.5-7。

表3.5-7　常用镁合金化学转化膜处理方法及特点

名称	化学处理液组成	特点	膜的主要组成和厚度
铬化处理	重铬酸钠（$Na_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$）：120~180 g/L 氟化钙（CaF_2）或氟化镁（MgF_2）：2.5 g/L 水：余量	所有镁合金的涂装底层，室内储存、中性环境中独立保护	铬酸盐和Mg（OH)$_2$ 8~11 μm
铬-锰处理	重铬酸钠（$Na_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$）：100 g/L 硫酸锰（$MnSO_4 \cdot 2H_2O$）：50 g/L 水：余量	镁锌合金的涂装底层	铬酸盐2~5 μm
硝酸铁处理	铬酸酐（CrO_3）：180 g/L 硝酸铁（Fe（NO_3)$_3 \cdot 9H_2O$）：40 g/L KF：3.5 g/L H_2O：余量	所有镁合金的涂装底层，室内存放或中性环境保护	铬酸盐0.5~5 μm
磷化处理	磷酸铵（$NH_4H_2PO_4$）：100 g/L 高锰酸钾（$KMnO_4$）：20 g/L 磷酸（H_3PO_4)$_4$：调溶液pH值：3.5	所有镁合金的涂装底层	Mg_3（PO_4)$_2$和Al、Mn等 磷化物；1~6 μm
锡酸盐处理	氢氧化钠（NaOH）：9.95 g/L 锡酸钾（$K_2SnO_3 \cdot H_2O$）：49.87 g/L 乙酸钠（$NaC_2H_3O_2 \cdot H_2O$）：9.95 g/L 焦磷酸钠（$Na_4P_2O_7$）：49.87 g/L	所有镁合金的涂装底层	$MgSnO_3$、Mg（OH)$_2$ 2~5 μm

2) 阳极氧化处理　镁合金阳极氧化工艺根据氧化处理液的成分分为酸性氧化液和碱性氧化液二种类型。主要以磷酸盐、高锰酸盐、可溶性硅酸盐、硫酸盐、氢氧化物和氟化物为主的阳极氧化，其具体工艺参数如表3.5-8。

阳极氧化处理比大多数化学转化处理的成本高，主要用在一些特殊性能要求场合，如耐磨或苛刻条件下的涂装前处理。

镁合金阳极处理膜中不仅包含了合金元素的氧化物，还包含了溶液中通过热分解并沉积到镁合金工件表面的其他氧化物，如B_2O_3、P_2O_5或Al_2O_3等氧化物。

阳极氧化膜具有不同程度的孔隙率，双层结构：内层为较薄的致密层；外层为较厚的多孔层。镁合金阳极氧化膜如

果不经封闭处理，则其空隙大、无规则、分布不均匀，且氧化膜不透明。因此，必须对其进行着色与封孔等后处理。进行着色与封孔处理的处理液根据阳极氧化处理的工艺不同有不同的配方，可分别采用$Na_2Si_4O_9$、$Na_2Cr_2O_7$和Na_2SiO_3，也可以采用有机物，如乙烯树脂、环氧树脂、环氧酚醛等进行密封处理，处理后的氧化膜渗入多种聚合物，可产生具有特殊性能的复合膜，如润滑性高或耐磨、耐蚀性复合膜。

阳极氧化处理前，所有金属表面必须彻底清洗，消除油膜或其他有机物的污染。常用清洗方法有：机械清洁处理（如喷砂清理，钢丝刷清理，湿的套筒或筒体研磨）、化学清洁处理（如真空去脂，溶剂清洁，乳浊液清洁，强碱清洁和酸洗）和氟化物阳极处理。

表 3.5-8 镁合金阳极氧化处理的主要工艺参数

阳极氧化处理液组成/$g \cdot L^{-1}$	处理条件	膜的性质
CrO_3：25 H_3PO_4（85%）：50 NH_4OH（30%）：160~180 ml/L	温度：75~95℃ 电流密度：16 A/cm² 电压：350 V（AC）	无光泽的 深绿色膜
KOH：250~300 Na_2SiO_3：25~45 C_6H_5OH：2~5	温度：77~93℃， 电流密度：20~32 A/cm² 电压：4~8 V	无光泽的 白色软膜
KF：35， Na_3PO_4：35 Al $(OH)_3$：35 KOH：165 K_2MnO_4 或 $KMnO_4$：20	温度：≤20℃，电流密度：1.5~2.5 A/cm² 薄膜：电压：65~70 V，时间：7~10 min 厚膜：电压：80~90 V，时间：60~90 min（AC）	厚 5~40 μm，棕黄色色氧化膜
NH_4HF_2：225~450 $Na_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$：50~125 H_3PO_4（85%）：50~110 ml/L	温度：70~80℃，电流密度：0.5~5 A/cm² 薄膜：电压：65~70 V，时间：4~5 min 厚膜：电压：90~100 V，时间：25 min	厚 6~30 μm，暗绿色复合膜
NH_4F：450 $(NH_4)_2HPO_4$：25	温度：20~25℃， 电流密度：48~100 mA/cm² 电压：190 V	无光泽的白色硬膜
$K_2Cr_2O_7$：25 $(NH_4)_2SO_4$：25	pH值：5.5，温度：20℃±1℃，时间：60 min 电流密度：0.8~2.4 mA/cm² 电压密度：1.2~3.6 mA/cm²	黑色膜

3）等离子微弧阳极氧化处理　微弧氧化又称等离子阳极氧化或阳极火花沉积，微弧氧化技术具有工艺简单、清洁无污染、膜层均匀质硬，材料适应性宽等特点，得到的微弧氧化膜，既具有普通氧化膜的性能，又兼有陶瓷喷涂层的优点，是传统阳极氧化技术的发展，是镁合金阳极氧化的重点发展方向。

微弧氧化是利用电化学方法，将材料置于脉冲电场环境的电解质溶液中，用高电压大电流在材料表面微孔中产生火花放电斑点，在热化学、等离子体化学和电化学共同作用下，原位生长成陶瓷膜层的阳极氧化方法。此技术主要应用在Al、Mg、Ti、Zr、Nb、Ta等金属或合金中。

一般认为微弧氧化过程分为4个阶段：第1阶段，表面生成氧化膜；第2阶段，氧化膜被击穿，并发生等离子微弧放电；第3阶段，氧化进一步向深层渗透；第4阶段，为氧化、熔融、凝固平衡阶段。在微弧氧化过程中，当电压增大至某一值时，镁合金表面微孔中产生火花放电，使表面局部温度高达1 000℃以上，从而使金属表面生成一层陶瓷质的氧化膜，其显微硬度在1 000HV以上，最高可达2 500~3 000HV；而且氧化时间越长，电压越高，生成的氧化膜越厚。但电压不应过高，否则使氧化膜大块脱落，并在膜表面形成一些小坑，从而降低氧化膜的性能。微弧氧化膜与一般的氧化膜一样，具有二层结构：致密层和疏松层。但微弧氧化膜的空隙小，空隙率低，生成的膜与基体结合紧密、质地坚硬、分布均匀，从而有更高的耐蚀性和耐磨性。

如薛文彬等利用10 g/L的$NaAl_2O_3$溶液，在30 kW的等离子微弧氧化装置中对ZK60合金进行2 h的微弧氧化处理，在膜表面获得了贫Zn富Al层，大大提高了其在0.1%H_2SO_4溶液中的耐蚀性。

微弧氧化工艺流程：材料表面清洁（除油、去离子水漂洗）→微弧氧化→自来水冲洗。该工艺比普通的阳极氧化工艺简单，成本低，效率高。应用微弧氧化技术，可根据需要，制备防腐蚀膜层、耐磨膜层、装饰膜层、电防护膜层、光学膜层、功能性膜层等，在航空航天、汽车、机械、化工、电子、医疗、建筑装饰等领域得到广泛应用。常用的部分微弧氧化工艺如表3.5-9。

4）表面渗层处理

① 氮化处理　镁合金可通过离子渗氮提高表面抗腐蚀能力。此方法是把氮气解离，用高压加速装置，把氮离子植入镁合金的表面。Nakatsugawa等人对镁合金AZ91D进行离子渗氮的研究表明：在5%的NaCl溶液中进行腐蚀试验，镁合金表面的氮离子在1×10^{16}离子/cm²时可明显提高耐蚀性，在5×10^{16}离子/cm²时平均腐蚀速率和腐蚀深度达到最小。没有渗氮的材料最大腐蚀深度为200 μm，而经5×10^{16}离子/cm²渗氮处理的材料的最大腐蚀深度才80 μm。可以看出，由于

氮离子的渗入大大提高了镁合金的抗腐蚀性能。图3.5-6为AZ91D合金的腐蚀速率随渗氮离子浓度而变化的情况。

表3.5-9　镁合金常用的部分微弧氧化工艺

电解液体系	电压/V	电流密度 /A·(dm)$^{-2}$	温度/℃	时间/min	膜厚度/μm
六偏磷酸盐系	≤340	2～10	15～30	15～120	30～100
硅酸盐系	300	5～15	10～20	15～120	10～95
磷酸盐系	≤300		15～30	15～120	10～100
偏铝酸盐系	≤340	15	20～40	15～120	20～105
磷酸盐与硅酸盐的复合系	≤300	2～10	15～30	15～120	10～100

② 渗铝处理　通过化学热处理或其他热扩散方法，在镁合金表面形成扩散型的富Al层，氧化时在镁合金表面生成致密的Al_2O_3或$MgAl_2O_4$层，从而提高镁合金的表面硬度和耐腐蚀性、耐磨性。X射线衍射分析，表面层主要由Mg和γ（$Al_{12}Mg_{17}$）相典型的金属间化合物组成。如Shige matsu和M Nakamura等人研究的固体粉末渗铝技术，将镁合金件埋入铝粉中，通入纯度大于99.995%的氩气，在450℃下加热1 h，然后在炉内冷却至100℃以下，可得到约750 μm的Al-Mg中间过渡层。经渗铝的AZ91D合金表面的硬度分布如图3.5-7，渗铝层的硬度为140～160HV，比基体材料的硬度（60HV）高很多。

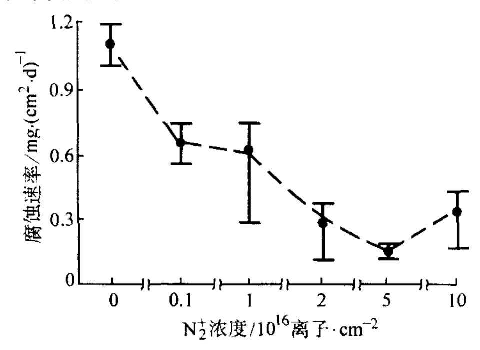


图3.5-6　氮离子浓度对腐蚀速率的影响

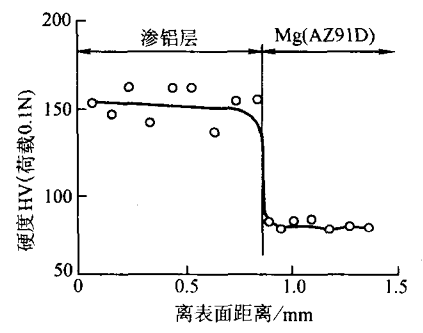


图3.5-7　表面硬度随深度的变化

5）金属涂层处理　一般采用电镀、化学镀和喷涂方法制备金属涂层。

① 电镀、化学镀　电镀、化学镀是利用化学还原法或电化学还原法在镁合金表面沉积所需金属元素，并与表面的镁形成结合牢固的致密层。但镁合金表面电镀或化学镀比较困难，一般采用化学转化镀金属。

电镀涂层材料一般选用Cu、Ni-Cr-Cu涂层。电镀工艺流程为：脱脂→酸洗→活化→浸镀Zn→预镀Cu→电镀。

化学镀层一般为Ni、Ni-P或其复合涂层，其工艺主要有浸Zn法和直接化学镀法。

a）浸锌法　浸锌法虽然可以在镁及镁合金表面成功进行化学镀。但是，浸锌法存在工艺复杂和氰化物废水处理等问题。

浸锌法工艺流程为：表面处理→活化→浸镀Zn→预镀Cu。其主要特点是预处理采用了浸锌和氰化镀铜。常用的浸锌和氰化镀铜工艺如下：

浸锌液的组成		氰化物镀铜液的组成	
$ZnSO_4 \cdot H_2O$	30 g/L	CuCN	38～42 g/L
$Na_4P_2O_7$	120 g/L	KCN	64.5～71.5 g/L
LiF	3 g/L	KF	28.5～31.5 g/L
Na_2CO_3	5 g/L	pH	10.2～10.4
pH	10.2～0.4	电流密度：1～2.5 A/cm^2	

b）化学镀法　镁合金表面直接化学镀Ni或Ni-P工艺可以得到厚度非常均匀的镀层，具有良好的耐蚀性和耐磨性，也易于钎焊，同时还可以赋予其他某些功能特性。Ni-P镀层的性能与P含量有很大关系，如含磷量高时，镀层为非磁性，但硬度低；含磷量低时，硬度较高，具有好的耐蚀性。镁合金直接化学镀Ni-P的镀液组成为：

$Ni_2(OH)_2CO_3$：12 g/L　　CH_4N_2S：0.4 g/L

$C_6H_8O_7$：5 g/L　　40%HF：10 ml/L

NH_4HF_2：10 g/L　　$NH_3 \cdot H_2O$：30 ml/L

$NaH_2PO_2 \cdot H_2O$：20 g/L

② 喷涂处理　喷涂法是利用物理方法在镁合金表面制备一金属层。涂层工艺有粉末直接扩散法、热浸涂扩散法和热喷涂扩散法。由于镁-铝两种元素有良好的相容性（$Mg_{17}Al_{12}$）和铝优良的耐蚀性（Al_2O_3），镁合金表面喷涂铝处理是提高镁合金耐蚀性的非常有效的途径。其工艺流程为：表面预处理→热喷涂铝→热扩散→封闭处理。

6）溶胶-凝胶法　溶胶-凝胶技术制备的金属涂层材料具有耐热、耐腐蚀及光、电、磁等功能。溶胶-凝胶技术以其温和的反应条件（室温或稍高温度、常压）、灵活多样的合成手段，成为开发多功能无机-有机复合膜材料的新的研究方向。溶胶-凝胶技术也逐渐应用于镁合金的表面处理。如朱立群研究的在正硅酸乙酯合成硅溶胶中引入一种含有机基团（甲基或苯基）的硅氧烷，涂覆在镁合金表面上，经120℃，1 h固化成膜，得到了平整、均匀、具有很好的耐水

续表 3.5-10

环境气氛与暴露时间/d		腐蚀速率/g·(m²·d)⁻¹		
		未配对 AZ31B-H24	阴极与阳极的面积比:1:6	阴极与阳极的面积比:6:1
城市环境	368	0.096	0.120	0.148
	722	0.101	0.120	0.173
	1 087	0.096	0.120	0.161
	2 575	0.078	0.099	0.130
	平均腐蚀速率	0.093	0.112	0.153

3）隔开异种金属，避免腐蚀介质构成回路　通常在异种金属之间使用绝缘的垫圈、填料或防潮膜，使镁与异种金属（如铝或钢）分开。如采用厚度为0.08 mm的乙烯树脂胶带或不吸水的橡胶胶带，或者在密封化合物和底漆中加入铬酸盐，避免电解液环境，以抑制电偶腐蚀（如图3.5-10）。

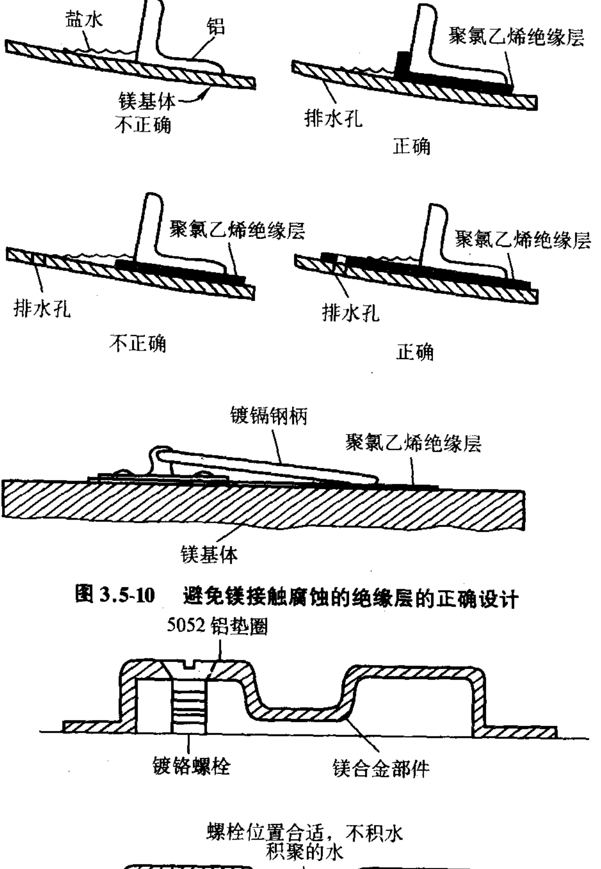


图3.5-10　避免镁接触腐蚀的绝缘层的正确设计

图3.5-11　镁部件螺栓连接时正确设计

4）正确设计镁合金零部件　为保证镁零件有良好的腐蚀防护性，装配件连接处合理的设计是非常必要的。首先应尽量避免镁构件表面产生可能聚集水滴的结构，并且考虑排水的构造。为避免缝隙的毛细管作用吸水，应尽量避免在零件上形成窄的缝隙、缺口或凹槽。此外，在零件上应避免形成尖角以避免材料处于高应力状态。图3.5-11和图3.5-12分别为镁合金零件结构设计时应注意的问题。

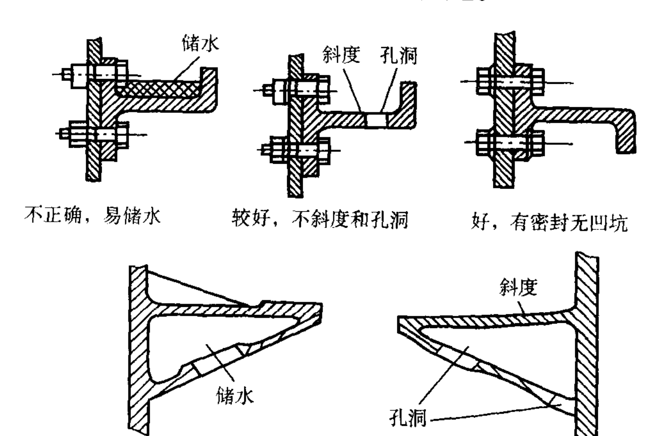


图3.5-12　镁部件避免介质储积的设计

6.4　紧固件的选择

镁合金不宜用作紧固件，而绝大多数镁合金装配件需要用铆钉、螺钉、螺母这类紧固件，因此螺栓组合的设计、紧固件材料的选择对镁在盐水中的应用是非常重要的。一般情况下，非金属材料能完全避免镁合金的电化学腐蚀，可以用作镁合金部件的紧固件和绝缘的垫圈。纯铝几乎能与所有的镁合金相容，含镁、锰、硅的铝合金与镁合金相容性较好，可以用作镁合金部件的紧固件，如5×××系铝合金的5056合金铆钉、5052合金垫圈以及6×××系的6061和6053合金铆钉。但铝铆钉在使用前需进行化学处理或阳极氧化处理。

对于镀铬钢螺栓，一般采用5052铝合金垫圈。对于钢铆钉、铜铆钉、钢、镍、铝（除5056、6053或6061铝合金以外）或黄铜螺钉与螺栓，在镁合金装配件中使用时，由于其与镁不相容，不能裸露使用，而必须对这些部件应先进行镀锡、锌或锡-铅合金，然后再进行化学处理后使用。

对于紧固件与镶嵌件的隔离，可采用特殊的有机涂层，如烘干的乙烯塑料溶胶、环氧树脂和耐高温的氟化烃类树脂涂层。

编写：马正青（中南大学）
审稿：田荣璋（中南大学）

性的膜层，10～15 μm 的涂膜在5%NaCl溶液中出现点蚀的时间约为400 h，表现出好的耐蚀性。硅杂烷化合物溶胶膜层热重（TG）实验，在 500℃范围内，硅杂烷化合物溶胶膜层的 DSC 曲线平稳，无放热峰和吸热峰；在 800℃以下的温度范围内，膜层的重量变化极平缓，重量损失小于 12%；在 350℃时，其重量损失约为 3%。

7）有机涂层及特殊涂层　有机物涂层是镁合金保护的一种常见的方法。应用于镁合金的有机物涂层有很多，如环氧树脂、乙烯树脂、聚氨酯以及橡胶等。涂装方法有喷涂、浸涂、刷涂、电泳涂装或粉末静电涂装。目前应用较多的是粉末静电涂装法。镁合金表面涂覆油、油脂、油漆、蜡和沥青等，也可作为短时间的防护处理的一种方法。但是有机涂层及特殊涂层只能用来短时间的保护金属，不能长期用作保护涂层。

6　镁合金构件的连接

6.1　镁合金与镁合金的连接

在许多实际使用情况下，镁合金之间的连接，由于同牌号镁合金的成分几乎是保持不变，它们之间的电化学腐蚀是非常轻微的。但是，在结合处可能会出现缝隙，聚集腐蚀介质，使镁与镁合金之间产生缝隙腐蚀。因此，在装配时，需要采取一些有效的预防措施：一是在镁合金零件表面采用铬酸盐颜料涂层，或者采用在连接处用封口胶的“湿装配”技术，阻碍水由毛细管作用而进入镁合金表面；二是正确地设计接触面和配套面，如螺栓连接时，螺栓的曲度有助于减少连接的腐蚀问题。另一种保护方式是，在构件组装前涂覆底漆，组装后再涂一层漆。镁与镁装配时的正确方法如图 3.5-8 所示。镁螺栓连接装配件，也可以采用此方法。

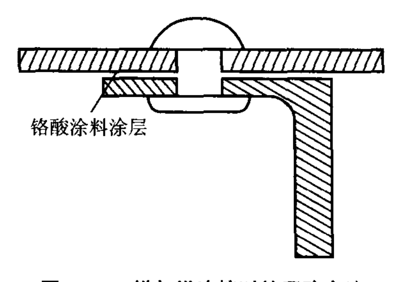


图 3.5-8　镁与镁连接时的正确方法

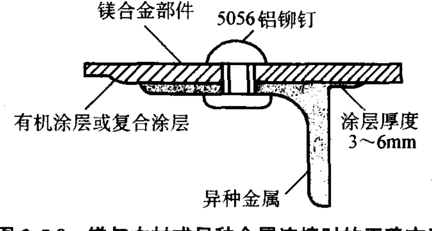


图 3.5-9　镁与木材或异种金属连接时的正确方法

6.2　镁合金构件与非金属材料的连接

镁构件与非金属的组合，虽然连接的大多数非金属材料，如塑料和陶瓷，对镁构件都不会产生电化学腐蚀，但是，镁构件与木材连接时，由于木材的吸水性，木材吸水后，内部的天然酸被浸析出来，使镁合金构件长期与酸接触，引起镁构件腐蚀。因此，与镁合金构件接触的木材必须采用油漆或清漆封闭，以防止吸水；并且在接触面还必须采用镁与镁装配时所用的保护措施，如镁零件表面采用铬酸盐颜料涂层。与镁合金构件连接的碳纤维增强塑料和镁构件与木材的装配一样，在一般的电解液中，镁表面易发生电化学腐蚀，如果不加保护将导致镁的腐蚀。镁合金构件与木材或异种金属连接时正确的保护方法如图 3.5-9。

6.3　镁与异种金属的装配

镁与异类金属装配时，接触金属之间的电位差和工作环境是引起镁腐蚀的主要因素。阻止或减少镁与异种金属之间的接触腐蚀，可以采用以下几种方法。

1）采用与镁相容的异种金属　镁与异种金属接触时，材料的电化学相容性尤为重要，异种金属与镁合金的电化学相容性好，可以明显减少构件的电化学腐蚀。高纯度的铝（99.99%）与镁有很好的电化学相容性，但在工业铝合金中，常有铁、铜的存在，会严重破坏这种相容性；此外，在高 pH 值的水溶液中，铝与镁的接触，会导致铝的腐蚀。常用的与镁相容的异种金属有：铝合金体系（5052、6053、6061、6063）、锌和锌合金体系。这些合金体系可用来做垫片、衬垫、紧固件和构件。当镁与其他金属，如不锈钢、钛、铜连接时，必须对其他金属进行表面处理，采取防护措施。与镁连接的金属材料，一般遵循下列优选原则：

镁合金与铝装配：5056、6061、5052、6053；镁合金与钢装配：镀锌钢、镀锌-锡（80%Sn-20%Zn）合金钢、镀锡钢。

镁合金与其他金属的装配，在腐蚀条件下镁都会发生腐蚀，因此都必须采取防护措施。镁合金与异类金属铆接的正确方法如图 3.5-9 所示。

2）对镁合金和异种金属同时采取保护措施　镁合金与异种金属接触时，用适当的表面处理保护镁和异种金属。通常对异种金属和镁都覆盖一层完整的膜，可以避免发生电偶腐蚀。但是，如果镁的防护膜破裂，则形成小阳极面积的镁与大阴极面积的异种金属原电池，镁的腐蚀速度显著增加，使镁发生严重的电化学腐蚀。一般情况下，应尽可能避免这种现象出现。同时，在使用防潮膜时，任何情况下，采用的保护膜必须是抗碱腐蚀的，这样，才能避免因腐蚀而形成强碱性的氢氧化镁所引起膜的破裂。阴极与阳极的面积比对镁合金腐蚀速率的影响见表 3.5-10。

表 3.5-10　镁合金 AZ31B-H24 与工业纯钛连接的面积比对腐蚀速率的影响

环境气氛与暴露时间/d		腐蚀速率/g·(m²·d)⁻¹ 未配对 AZ31B-H24	阴极与阳极的面积比:1:6	阴极与阳极的面积比:6:1
潮湿环境	3	17.4	26.5	88.7
海洋环境	358	0.106	0.171	0.372
	715	0.095	0.156	0.235
	1 087	0.082	0.125	0.207
	2 563	0.077	0.115	0.204
	平均腐蚀速率	0.090	0.142	0.255

参考文献

1 吴秀铭．发展中的中国镁工业及其发展成果．中国有色金属工业协会镁业分会高层论坛报告，2004年5月，北京

2 徐日瑶．金属镁生产工艺学．长沙：中南大学出版社，2002

3 姜峰，张喜燕．镁基材料合金化研究最新进展．材料导报，2004，Vol.18（2）：45

4 余琨，黎文献等．变形镁合金的研究．开发和应用．中国有色金属学报，2003（2）：1

5 Raymond. F. Decker. Advanced Mater. & Proc., 1998（9）：31

6 Asm International. Magnesium And Magnesium Alloy. OH：Metal Park，1999

7 T. Aida, H. Hatta, C. Ramesh. Proc. of the 3rd Inter. Magnesium Confer.. Manchester, 1996：143

8 F. H. Froes, D. Eliezer and E. Aghion. JOM. 1998（9）：30

9 R. W. Cahn，师昌绪，柯俊．非铁合金的结构与性能．北京：科学出版社，1999

10 Byron.B.Clow. Advanced Mater. & Proc., 1996（10）：33

11 Y. Kojima. Mater. Sci. Forum, 2000, Vol.350～351：3

12 I.J. Polmear. Mater. Sci. & Tech., 1994, Vol.10：1

13 Hakon Westengen. Light Metal Age, 2000（4）：44

14 D. H. Kirkwood. Inter. Mater. Reviews, 1994, Vol.39（5）：173

15 谢水生，黄声宏．半固态金属加工技术及其应用，北京：冶金工业出版社，1999

16 E. Aghion, B. Bronfin. Mater. Sci. Forum, 2000, Vol.350～351：19

17 D. Eliezer, E. Aghion. F.H. Froes. Advan. Perfor. Mater., 1998，（5）：201

18 Das.S.K., Chang.C.F.. Magnesium Alloys and their Applications, FRC. DGM Infoymation sgesellschaft, 1992：487

19 美国金属学会．金属手册．第9版．北京：冶金工业出版社，1992

20 第一汽车制造厂．机械工程材料手册：有色金属材料．北京：机械工业出版社，1997

21 余琨，黎文献．含稀土镁合金的研究与开发．特种铸造及有色合金，2001（1）：41

22 T.R. Massalski. Binary Phase Digrams. 2nd ed.. Vol.1～4, OH：Metals Park，1990

23 K.U. Kainer. Magnesium Alloys and Technology. GKSS Research Center Geesthacht GmbH. January 2003

24 Makar G L, Kruger J. Corrosion of Magnesium [J]. International Materials Reviews, 1993, 38（3）：138～153

25 孙秋霞．材料腐蚀与保护．北京：冶金工业出版社，2002

26 Markar G L, Kruger J. Corrosion studies of rapidly solidified magnesium alloy [J]. Electrochemical Soc, 1990, 137（2）：414～421

27 Galum, R., Weisheit, A., Mordike, B.L.. Properties of Laser Alloyed Sueface Layers on Magnesium Base Alloys：Magnesium Alloys and Their Applications. DGM, Frankurt, 1998

28 曾爱平，薛颖等．镁合金表面改性新技术[J]．材料导报，2000，14（3）：19～20

29 钱苗根，姚寿山．现代表面技术[M]．北京：机械工业出版社，1999

30 Xiang Y H. A Study on Surface State During the Oretreatment of Electroless Nickel Plating on Magnesium Alloys. Trans TMF, 2001, 79（1）：30～35

31 张淑芬，张光锋，蒋百灵，溶液电导率对镁合金微弧氧化的影响[J]，材料保护2004，37（4）：7—10.

32 蒋百灵，张淑芬，吴国建，镁合金微弧氧化陶瓷层耐蚀性的研究[J]，中国腐蚀与防护学极，2002，22（5）：300～303.

中国材料工程大典
CHINA MATERIALS ENGINEERING CANON

第4卷 有色金属材料工程（上）

第4篇

铜及铜合金

主　编　汪明朴　尹志民
主　审　唐仁政
编　写　汪明朴　尹志民　钟卫佳
　　　　曹玲飞　马可定　李　周
　　　　宋练鹏　周　逵　娄花芬
　　　　李百治　孟惠娟
审　稿　中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会

第1章　概　　述

目前，铜及铜合金已成为第二大有色金属，是全球经济各行业中广泛需求的基础材料。铜及铜合金只所以得到广泛应用，是由于其具有一系列不可替代的优异特性。

1）铜及其合金具有优良的导电和导热性能，在所有金属中，铜的导电性仅次于银，为100%IACS，高纯铜甚至可达103%IACS。铜的导热性是所有金属中最好的，为420 W/（m·K)。当然，随着合金化程度的提高，铜合金的导电性和导热性会随之降低，但强度会显著提高，人类现代技术已发展了一系列实现铜合金高强高导的途径。导电、导热是铜及其合金最重要的应用。

2）铜是抗磁性金属，并且抗磁性磁化率极低，因此铜及其合金在抗外磁场的环境下得到了广泛应用，如仪表、罗盘、航空、航天、雷达等，但含Fe、Mn及高Ni的铜合金不在此之列。

3）铜的摩擦因数很小，因此以铜为基的铜合金耐磨性能优良，尤其是含Sn的多元铜合金。因此它们广泛地用于机器设备上许多重要的耐磨零件，如轴套、轴瓦、涡轮等。

4）铜的电极电位很高，高于氢，其标准电极电位为+0.34 V，因此铜的耐腐蚀性能良好，在许多介质中都是很稳定的，大部分以铜为基的铜合金在大气和海水中具有很高的耐腐蚀性，在稀的非氧化氢氟酸、盐酸、磷酸及醋酸溶液中也有很高的化学稳定性。

5）铜具有面心立方晶格，无同素异构转变，因而具有很高的塑性，非常易于加工成形。铜尽管强度很低，但不少元素在铜中溶解度都较大，固溶强化效果好，这使得很多铜合金兼具有高强度和高韧性，从而广泛用来制造高强、高韧、高导电、高导热和高耐蚀的重要零件。

6）铜在水等介质中会释放出铜离子，铜离子具有抑制细菌生长和抑制某些水生生物生长的作用，因此铜及其合金还广泛应用于人类饮用水输送管道、洗衣机内筒和船只的重要部件如螺旋桨等上。

7）铜呈紫红色，并通过合金化可形成金黄色和银白色，色调古朴典雅，这一特性使其广泛应用于货币和各类工艺美术品上。

8）铜通过合金化，还可使其产生一些奇特性能，如形状记忆效应，超弹性和减振性等。

铜和铜合金最普通的分类方法是将其分成六大类：紫铜、高铜合金、黄铜、青铜、白铜和锌白铜。第一大类——紫铜，基本上是工业纯铜，紫铜通常软且有韧性，含杂质总量低于约0.7%。高铜合金含有少量的各种合金元素如铍、镉、铬或铁等，每一种合金元素的固溶度小于8%（摩尔分数）；这些元素可改善铜的一种或一种以上基本性能，其余几大类的每一类都含有五种主要合金元素中的一种，以作为每类合金的初始合金的组分（表4.1-1）。加工铜合金和铸造铜合金的总分类示于表4.1-2中。

工业纯铜一般包括普通纯铜、脱氧铜无氧铜及特种铜。不同纯度和含某种微量元素的工业纯铜表面常带有玫瑰紫色的氧化膜，故亦称紫铜。紫铜规定的最少铜含量不小于99.3%（质量分数），以字母T表示。材料具有高的导电性、导热性、抗蚀性和塑性。普通纯铜含氧量较高，不能在还原性介质中加热，以免发生“氢脆”，主要用于导电导热元件。脱氧铜残留一定的脱氧剂元素，强烈降低铜的导电性，只宜作结构材料使用。无氧铜中氧和杂质的含量极低，主要用于电真空器件。特种铜含有不同的微量特定元素，如含砷铜、含银铜、含碲铜和弥散铜等，主要用于导电结构件。

表4.1-1　铜合金五种基本元素

类别	合金元素	固溶度（摩尔分数，20℃）/%
黄铜	锌	37
锡青铜	锡	9
铝青铜	铝	19
硅青铜	硅	8
白铜、锌白铜	镍	100

表4.1-2　铜合金总分类

通用名	成分
加工铜合金	
铜	>99%Cu
高铜合金	>96%Cu
黄铜	Cu-Zn
加铅黄铜	Cu-Zn-Pb
锡黄铜	Cu-Zn-Sn-Pb
磷青铜	Cu-Sn-P
加铅磷青铜	Cu-Sn-Pb-P
铜-银-磷合金	Cu -Ag-P
铝青铜	Cu-Al-Fe-Ni
硅青铜	Cu-Si
其他铜合金	…
白铜	Cu-Ni-Fe
锌白铜	Cu-Ni-Zn
铸造铜合金	
铜	>99%Cu
高铜合金	>94%Cu
红色黄铜和加铅红色黄铜	Cu-Zn-Sn-Pb（75%～89%Cu）
黄色黄铜及加铅黄色黄铜	Cu-Zn-Sn-Pb（57%～74%Cu）
锰黄铜和加铅锰黄铜	Cu-Zn-Mn-Fe-Pb
硅青铜，硅黄铜	Cu-Zn-Si
锡青铜和加铅锡青铜	Cu-Sn-Zn-Pb
镍-锡青铜	Cu-Ni-Sn-Zn-Pb
铝青铜	Cu-Al-Fe-Ni
白铜	Cu-Ni-Fe
锌白铜	Cu-Ni-Zn-Pb-Sn
加铅铜	Cu-Pb
其他铜合金	…

黄铜是以锌为主要添加元素的铜合金，含有或不含有少量的其他元素。只含锌的铜-锌二元合金称为普通黄铜或简单黄铜，除锌以外还含有其他添加元素的铜合金称为复杂黄铜或特殊黄铜。黄铜的铜质量分数一般为55%～96%，以字母H表示。黄铜具有良好的力学性能、耐蚀性、导电性、导热性和加工工艺性，价格低，色泽美，是应用最广、最经济的结构用铜合金。高锌黄铜在冷作硬化状态下有应力腐蚀倾向（季裂），应注意消除应力退火。脱锌腐蚀是高锌黄铜的另一个突出问题，可选用低锌黄铜或在黄铜中加入微量As、Sn、P、Sb等元素抑制合金脱锌。在含微量氧的氮气中退火，生成氧化物薄膜，也可抑制脱锌，获得较好的表面质量。

青铜是以除锌和镍以外的其他元素为主要添加元素的铜合金，通常以铜以外的第一主元素名称命名青铜的类别。青铜品种繁多，其中以锡青铜、铝青铜、铍青铜应用较广；还有硅青铜、锰青铜、钛青铜、铬青铜及锆青铜等。青铜以字母Q表示。材料具有比黄铜高的力学性能，良好的耐蚀性、耐磨性、耐热性，高的弹性，且加工成形性能好，铸件体积收缩率小。主要用于承力的耐蚀、耐磨零件、弹性元件等。

白铜是以镍为主要添加元素的铜合金，含有或不含有一定量的其他元素。只含Ni的铜-镍二元合金称为普通白铜，除Ni以外还含有其他添加元素的铜合金成为复杂白铜。通常分为结构白铜和电工白铜（锰白铜），以字母B表示。对于铜-镍系合金，当Ni在10%以下时呈赤铜色，随Ni含量的增加赤铜色急剧减弱。Ni的质量分数达到20%时变为白色，因此有“白铜”之称。白铜的突出特点是在腐蚀性介质中有极高的化学稳定性，并具有高的力学性能，高的耐热性和耐寒性，足够的加工成形性。结构白铜主要用于在高温强腐蚀介质中工作的零件；电工白铜主要用于电阻元件、热电偶及其他精密电测仪器零件。

铜合金按其固有强化途径还可分为固溶合金、变性固溶合金、时效强化合金等。

1）固溶合金　最适合于铜的合金元素是那些能与铜形成固溶相的元素，这些元素包括如表4.1-2所示的生成各类实用合金的所有元素以及锰。它们在这些合金体系中硬化作用大，足以达到实用目的，而不会遇到由第二相或化合物带来的脆性。弹壳黄铜是典型的固溶合金。弹壳黄铜含30% Zn，由于偏析偶尔有少量β相出现，但β相通常在第一次退火后就消失。

铜的固溶强化合金以其强度和可成形性而著称。因为固溶强化合金是单相，而且在加热或冷却过程中均不发生相变，所以用冷轧或冷拔这样的冷加工方法，便可以达到其最大强度。

2）变性固溶合金　添加元素还可形成变性固溶合金，添加元素可反应形成金属间化合物弥散颗粒，此弥散过程有晶粒细化和强化作用，故可产生更高的强度。因为这种变性处理不需要大量的昂贵元素，所以收效是相当经济的。

95Cu-2.8Al-1.8Si-0.4Co合金是一种变性固溶高强度合金，其退火抗拉强度为570 MPa，冷轧状态的抗拉强度为660～900 MPa，钴便是这种能形成金属间化合物弥散强化的元素。

3）时效硬化合金　时效硬化可产生很高的强度，但是只局限于合金元素的溶解度随温度降低而急剧减小的少数几种铜合金，铍-铜就是这种时效硬化铜合金的典型代表。

含1.6%～2.0% Be和约0.25% Co（质量分数）的铍青铜，常常叫做“金色合金”。因为其中有大量的铍（摩尔分数约12%）存在，故放出耀眼的光环。其经冷加工时效后的屈服强度大于1 380 MPa，电导率的范围视冷加工量和热处理工艺的不同而在20%～30% IACS之间。

其他时效硬化合金包括：锆-铜、铬-铜、铜-铁-磷、铜-镍-硅等合金。

铜-镍-锡合金也属时效强化型合金，其靠调幅分解作用得到硬化。靠冷加工与热加工相结合，这些合金可以达到与硬化铍-铜相等的高强度。成形特性的各向同性是这类合金所独有的，这样就不会反映出加工合金常有的方向性。

4）其他合金　某些铝青铜，尤其是含铝量大于9%的铝青铜，可以在临界温度以上淬火以得到硬化，此硬化过程属马氏体型过程，类似于铁-碳合金淬火时发生的马氏体型硬化，淬火后进行回火韧化或用间断式淬火代替标准式淬火还可进一步改善铝青铜性能。加入镍或锌的铝青铜，利用可逆马氏体相变还可产生形状记忆效应。

5）不溶性合金元素　为了提高机加工性能，把铅、碲和硒添加到铜和铜合金中。碲和硒以及铋，使合金的热轧和热成形几乎成为不可能，并严重限制了冷加工的使用范围。高锌黄铜避免了这些限制，因为高锌黄铜在高温下完全变成了β相。β相可以溶解铅，因而避免在热锻或热挤压温度下生成液态晶界相。大多数易切削黄铜棒材是用β相挤压法生产的。

编写：汪明朴（中南大学）
尹志民（中南大学）
钟卫佳（中南大学）
审稿：唐仁政（中南大学）

第2章　高导电高导热铜及铜合金

1　普通纯铜

高导电用普通纯铜是铜的质量分数不低于99.7%，杂质量极少的含氧铜，工业最常用的牌号是T1、T2和T3。外观呈紫红色，故又称为紫铜，其再结晶温度为200～280℃。

T1和T2是阴极重熔铜，含微量氧和杂质，具有高的导电、导热性，良好的耐腐蚀性和加工性能，可以熔焊和钎焊。主要用作导电、导热和耐腐蚀元器件，如电线、电缆、导电螺钉、壳体和各种导管等，航空工业多使用T2。

T3是火法精炼铜，含氧和杂质较多，具有较好的导电、导热、耐腐蚀性和加工性能，可以熔焊和钎焊。主要作为结构材料使用，如制作电器开关、垫圈、铆钉、管嘴和各种导管等；也用于不太重要的导电元件。

T1、T2、T3在含氢的还原介质中易产生氢脆，俗称“氢病”，故不宜在高温（>370℃）还原介质中进行加工（退火、焊接等）和使用；在低温（至-250℃）下，其强度将会提高。

常用普通纯铜的牌号见表4.2-1。

表4.2-1　常用普通纯铜的牌号

国别	GB（中国）	DIN（德国）	ГОСТ（俄罗斯）	ASTM（美国）	BS（英国）	NF（法国）	JIS（日本）	ISO
牌号	T1	—	M0	—	—	Cu/a1	C1020	—
	T2	E-Cu58	M1	C11000	C101、C102	Cu/a2	C1100	Cu-ETP
	T3	—	M2	C12500	C104	Cu/a3	—	Cu-FRTP

1.1　化学成分

按GB/T 5231—2001规定，常用普通纯铜的化学成分见表4.2-2。

根据ASTM规定，美国普通纯铜牌号有C11000、C12500，其成分范围如下：

表4.2-2　常用普通纯铜的化学成分　　%

牌号	Cu+Ag	P	Bi	Sb	As	Fe	Ni	Pb	Sn	S	Zn	O	杂质总和
	≥	≤											
T1	99.95	0.001	0.001	0.002	0.002	0.005	0.002	0.003	0.002	0.005	0.005	0.02	0.05
T2	99.90	—	0.001	0.002	0.002	0.005	—	0.005	—	0.005	—	—	0.1
T3	99.70	—	0.002	—	—	—	—	0.01	—	—	—	—	0.3

注：1. 表中未列入的杂质包括在总和内。
2. T2～T3的磷含量在杂质总和内控制，对导电用T2，杂质磷含量不大于0.001%。
3. T3在杂质总和中的铅含量，经需方同意可不超过0.025%。

C11000：$(Cu+Ag)_{min}$99.90%，记作99.95Cu-0.04O。

C12500：Cu99.88%+Ag_{min}（最小Ag含量可协商确定），As_{max}0.012%，Sb_{max}0.003%，$(Se+Te)_{max}$0.025%，Ni_{max}0.05%，Bi_{max}0.003%，Pb_{max}0.004%。

1.2　物理及化学性能

(1) 热学性能

1) 熔点　T1为1 084.5℃；T2为1 065～1 082.5℃；T3为1 065～1 082℃；C11000为1 083℃；C12500为1 085℃。

2) 熔化潜热　T1、T2为212.5kJ·kg^{-1}；C11000为205.4 kJ·kg^{-1}。

3) 沸点　2 350～2 600℃。

4) 比热容　385～420 J·(kg·K)$^{-1}$（20℃时，C11000与C12500为385 J·(kg·K)$^{-1}$）。

5) 热导率　20℃时，C11000为388 W·(m·K)$^{-1}$；C12500为377 W·(m·K)$^{-1}$；普通纯铜在不同温度下的热导率见表4.2-3。

表4.2-3　常用普通纯铜的热导率

温度 θ/℃	-256	-160	-79	0	20	100	324	667
热导率 λ/W·(m·K)$^{-1}$	约5 024	450	400	391	390	380	352	339

6) 热膨胀　0～1 084.5℃的线胀率为2.25%，各温度范围线胀系数见表4.2-4。

表4.2-4　常用普通纯铜线胀系数

温度 θ/℃		20～100	20～200	20～300
线胀系数 α/10^{-6}K^{-1}	T1、T2、T3	16.92	17.28	17.64
	C11000	17.0	17.3	17.7
	C12500	—	—	17.7

7) 蒸汽压　见表4.2-5。

表4.2-5　常用普通纯铜的蒸汽压与温度的关系

温　度 θ/℃	蒸发速度 v/g·(cm^2·s)$^{-1}$	蒸汽压 p/Pa
870.9	2.438×10^{-8}	0.233×10^{-8}
924.0	10.733×10^{-8}	1.054×10^{-8}
1 021.3	134.428×10^{-8}	13.672×10^{-8}
1 084.5	689×10^{-8}	71.8×10^{-8}
1 194.7	5 580×10^{-8}	611×10^{-8}

8) 热焓　见图4.2-1。

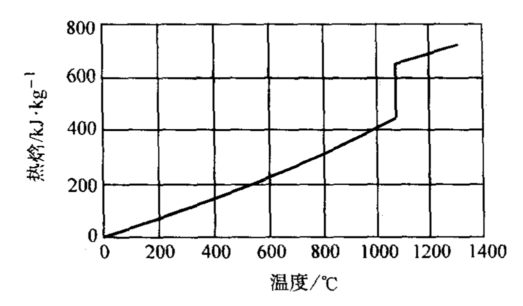


图 4.2-1 T1（C11000）铜的热焓与温度的关系

（2）质量特性

20℃时，99.999%加工纯铜的密度为 8 958 kg/m³，铸态电解精铜的密度为 8 300～8 700 kg/m³（可取平均值 8 500 kg/m³），铸态无气体的电解精铜的密度为 8 850～8 930 kg/m³（可取平均值 8 920 kg/m³），C11000 与 C12500 的密度为 8 890 kg/m³。加工铜的密度与温度的关系见表 4.2-6。

表 4.2-6 加工铜的密度与温度的关系

状态	固态				液态	
温度 θ/℃	20	900	1 000	1 084.5	1 084.5	1 200
密度 ρ/g·cm⁻³	8.930	8.680	8.470	8.320	7.990	7.810

T1（C11000）铜的密度与冷加工率的关系见图 4.2-2。

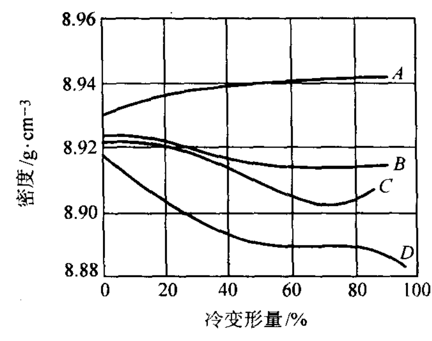


图 4.2-2 T1（C11000）铜的密度与冷加工率的关系

A—在 880℃真空退火 12 h，冷拔；
B—在 970℃真空退火 12 h，冷轧带材；
C—在 995℃真空退火 12 h，冷拔；
D—在 600℃真空退火 4 h，拉拔

（3）电学性能

根据技术标准规定，T2 线材的电性能见表 4.2-7。

表 4.2-7 技术标准规定的 T2 线材在 20℃时的电阻率

材料状态	电阻率 ρ/μΩ·m	技术标准
软（M）	≤0.018 00	GB/T 14953—1994
硬（Y）	≤0.018 20	

20℃时普通纯铜的电阻率和电导率见表 4.2-8。

表 4.2-8 普通纯铜的电阻率和电导率

牌号	T1	T2	T3	C11000	C12500
电导率/%IACS	102.3①	101.5①	100.6	101.5（060）②	98
电阻率 ρ/μΩ·m	0.016 8	0.017 1	0.017 1	0.017 0③	0.017 6

① 700℃退火 30 min 后测定。
② 060 为软退火状态。
③ 100% IACS 材料在 -100～200℃时的电阻温度系数为 0.003 93 K⁻¹，101%IACS 材料在 -100～200℃时的电阻温度系数为 0.003 97 K⁻¹。H14 状态：1.78 μΩ·m。97%IACS 材料在 0～100℃时的电阻温度系数为 0.003 81 K⁻¹。

软态 T1 在不同温度下的电阻率见表 4.2-9，退火温度对 T2 电阻率的影响见图 4.2-3。

表 4.2-9 T1 在不同温度下的电阻率

温度 θ/℃	20	100	200	300	400	460
电阻率 ρ/μΩ·m	0.016 8	0.022 5	0.029 6	0.036 6	0.043 7	0.047 9

温度 θ/℃	1 084.5 固态	1 084.5 液态	1 100	1 340	1 450
电阻率 ρ/μΩ·m	0.102 0	0.213 0	0.214 3	0.233 9	0.242 2

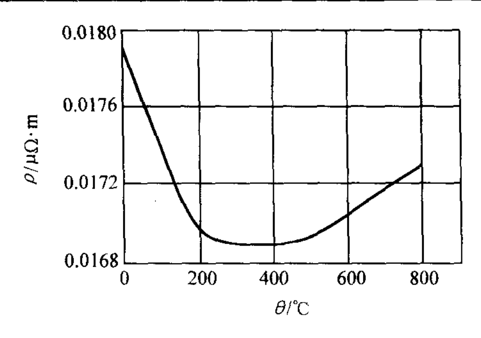


图 4.2-3 T2 的电阻率与退火温度的关系（保温 1 h）

铜的电阻随着冷变形量的增大而上升，其增量可大致按下式估算（冷加工铜的抗拉强度 σ_b = 315～470 MPa）：$\rho = \frac{\sigma_b}{157}\%$，纯铜导电率随冷拉截面收缩的增大而下降，压力加工对铜的导电率影响见表 4.2-10 及图 4.2-4。

表 4.2-10 纯铜冷拉引起的导电率降低 %

断面收缩率 ψ/%	25	50	75	87.5
导电率降低 $\Delta\rho$/%	1.5	2.0	2.3	2.6

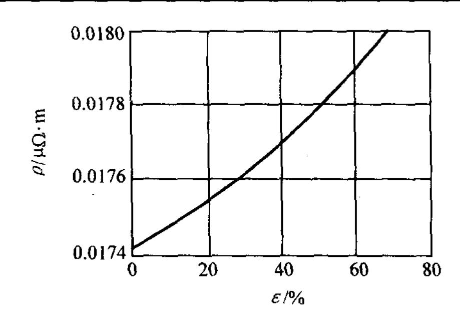


图 4.2-4 T2 的电阻率与变形率的关系

铜的热电势与温度的关系见图 4.2-5。

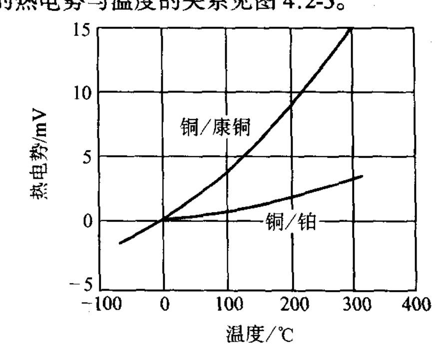


图 4.2-5 铜的热电势与温度的关系
（0℃铜与冷端的热电性能）

电化当量 Cu^{2+}，0.329 mg/C；Cu^{+}，0.659 mg/C

电解质溶液的电势：对标准氢电极时，Cu^{2+} 为 -0.344 V；Cu^{+} 为 -0.470 V。20～50℃时的温度系数为 -0.01 mV/K。

氢超压：在稀硫酸溶液中约为 0.23 V，但比值随电流密

度变化而改变。

霍尔系数：-52 pV·m/（A·T）。

（4）扩散系数与激活能

铜中的扩散系数 D_0 与扩散激活能 Q（$D = D_0 \times e^{-Q/R(t+273)}$）见表4.2-11。

表4.2-11 铜中的扩散系数 D_0 与扩散激活能 Q

温度 θ/℃	D_0/cm²·s⁻¹	Q/kJ·mol	备注
685～1 062	0.468	197.99	纯铜内自扩散
270～650	0.011	38.64	氢在电解铜中扩散
600～950	0.748	193.20	氧在电解铜中扩散

（5）液态电解铜的表面张力与黏度

液态电解精炼铜的黏度 μ 见表4.2-12，而铜的表面张力 γ 见表4.2-13。

表4.2-12 液态电解精铜的黏度 μ

温度 θ/℃	1 084.5	1 100	1 145	1 200	1 300
黏度 μ/g·(cm·s)⁻¹	0.035 3	0.035 0	0.034 1	0.031 1	0.290 0

表4.2-13 铜的表面张力

温度 θ/℃	表面张力 γ/N·cm⁻¹	备注
1 084.5	0.110 3～0.165 0	固态铜
1 140	0.112 0	液态无氧电解铜
1 200	0.116 0	
1 250	0.119 3	
1 300	0.122 6	

（6）磁性

纯铜为抗磁性物质，室温磁化率为 -0.085×10^{-6}，温度对其磁化率的影响不大。铁磁性杂质（特别是铁）若在铜中呈不溶状态，则使铜显铁磁性。

（7）声学性能

99.9%Cu（$\rho=8.910$ g/cm³）通过自身固定频率振动传播的声速为：

温度 θ/℃	声速 v/m·s⁻¹
0	3 852
14.6	3 846
100	3 815

材料状态与声速的关系

轧制状态	3 852 m/s
退火状态	3 730 m/s

对超声波（1.765～22.3MHz）的传播

纵波（20℃）	max 4 605 m/s
横波（20℃）	max 2 210 m/s

（8）光学性能

紫铜T1为淡红色，对光的反射率为：

红外线（>700 nm）	>95%
可见光（630～430 nm）	80%～50%
紫外线（400～200 nm）	40%～10%
420 nm	32.7%
500 nm	43.7%
600 nm	71.8%
700 nm	83.4%

纯铜的辐射率与波长及温度的关系见表4.2-14及图4.2-6。总发射率为反射率与辐射率之和。光谱辐射率即热辐射为铜表面辐射强度与黑体辐射强度之比（表4.2-15）。

表4.2-14 纯铜的辐射率

波长 λ/nm		700	600	500
辐射率 δ/%	1 000℃时	8.7	18.5	40.4
	1 125℃时	11.8	20.5	38.7

表4.2-15 纯铜的光谱辐射率

温度 θ/℃	550 nm	650 nm	全波长的
1 075	0.47	0.17	0.16
1 125	0.38	0.15	0.15
1 175	0.32	0.14	0.15
1 225	0.28	0.13	0.14

（9）弹性模量

20℃时纯铜的弹性模量为105～137 GPa，切变模量为38～48 GPa。C11000及C12500在O60状态，拉伸弹性模量为115 GPa，切变模量为44 GPa；C11000在H状态拉伸弹性模量为115～130 GPa，切变模量为44～49 GPa。再结晶铜的弹性模量见表4.2-16。

表4.2-16 20℃时再结晶铜的弹性模量和泊松比

弹性模量 E/GPa	切变模量 G/GPa	压缩模量 K/GPa	泊松比 ν	材料
125	46.4	139	0.35	退火软化电解铜
133	—	—	—	高纯铜

（10）衰减能量比

铜的衰减能量决定于振幅，在某些情况下也与振动频率、材料状态有关，未达到某一加工率时，衰减能量随冷加工率的增大而上升。退火单晶铜的单位衰减能量为 5×10^5；对数衰减量：退火材料为3.2，冷轧到硬状态时为5.0。

（11）摩擦因数

在无润滑条件下，纯铜与下列材料间的摩擦因数为：

接触材料	滑动	静止
碳钢	0.53	0.36
铸铁	1.05	0.29
玻璃	0.68	0.53

（12）化学性能

1）抗氧化性能　铜耐高温氧化性能较差，在大气中于室温下即缓慢氧化。温度升至100℃时，表面生成黑色CuO，其氧化速度与时间的对数成正比。当温度升至400℃以上时，氧化速度按下式推算：

$$x=\sqrt{Kt}$$

式中，x 为氧化膜重量，g/cm²；t 为持续时间，s；K 为系数。

在空气中，各温度下的 K 值见表4.2-17。

表4.2-17 不同温度的 K 值

温度 θ/℃	700	800	900	1 000
系数 $K/10^{10}$	8.03	79.7	336.0	1350.0

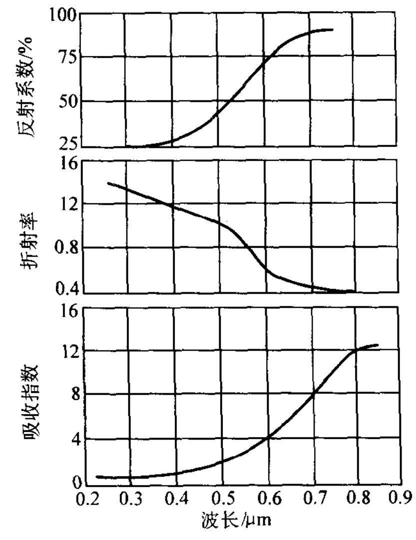


图4.2-6 T1（C11000）及同类铜20℃的光学性能

2）耐腐蚀性能 铜与大气、水等作用，生成难溶于水的复盐膜，能防止铜继续氧化。

铜的耐蚀性良好，在大气中的腐蚀速率为 0.002～0.5 mm/a，在海水中的腐蚀速率为 0.02～0.04 mm/a。铜有较高的正电位，在非氧化无机酸和有机酸介质中均保持良好的耐蚀性，但在氨、氰化物、汞化物和氧化性酸水溶液中的腐蚀速率较快。

美国纯铜的化学性能见表 4.2-18。

表 4.2-18 美国纯铜的化学性能

合金	化学性能
C10100、C10200	按电动势，铜呈阴级，位于氢之前。因此，在与 Fe、Al、Mg、Pb、Sn、Zn 组成电偶时为阴极。C10100、C10200 对大气、淡水、微咸水和海水有很强的抗蚀性，在非氧化酸中也有良好的抗蚀性，但对氧化性酸、湿氨、湿卤素、硫化物、含铵离子溶液的抗蚀性很低
C11000	C11000 对下列介质有相当强的抗腐蚀特性：全部饮用水、多种工业水、矿泉水、矿井水、海水、微咸水；乙酸、醋酸、碳酸、柠檬酸、甲酸、草酸、酒石酸、脂肪酸、亚硫酸、纸浆厂亚硫酸盐溶液；熔融氢氧化钠与氢氧化钾，浓的或稀的苛性碱溶液；氯化铝、硫酸铝、氯化钙、硫酸铜、碳酸钠、硝酸钠、硫酸钠、硫酸锌溶液 C11000 抗土壤腐蚀，可在地下设施中应用；空气中不可用于氧化性酸介质中，如硝酸、氨水、酸性铬酸盐溶液、三氯化铁、汞盐、高氯酸盐、高硫酸盐溶液、充气的非氧化性酸如硫酸、乙酸 紫铜在氨水和可引起黄铜应力腐蚀开裂的溶液中无应力腐蚀开裂倾向，但在还原性气氛，特别是在有氢存在的还原性介质中易变脆

1.3 热加工与热处理规范

普通纯铜（T1、T2、T3）与 C11000 以及 C12500 铜的热加工与热处理规范见表 4.2-19。

表 4.2-19 不同纯铜的热加工与热处理规范

牌号	退火温度/℃	热加工温度/℃	典型软化温度/℃
C11000	475～750	750～875	360
C12500	400～650	750～900	—
T1、T2、T3	380～650	800～900	—

1.4 力学性能

（1）技术标准规定的性能（表 4.2-20～表 4.2-24）

（2）各种温度下的力学性能

1）普通纯铜各种温度下典型的力学性能见表 4.2-25～表 4.2-28，图 4.2-7～图 4.2-13。

2）硬度 普通纯铜室温硬度为 35～45HBS（M 态），110～130HBS（Y 态），高温硬度见表 4.2-29，退火温度及变形率对 T2 硬度的影响分别见图 4.2-14 和图 4.2-15。

表 4.2-20 普通纯铜技术标准规定的拉伸性能

品种	牌号	状态	δ 或 d/mm	σ_b/MPa	δ_{10}/%	δ_5/%	技术标准
				≥			
带材	T2 T3	M	0.05～2.0	206	30	—	GB/T 2059—2000
		Y_2		245～345	8	—	
		Y		294	3	—	
板材	T2 T3	R	4～14	196	30	—	GB/T 2040—2002
		M	0.5～10	196	32	—	
		Y_2	0.5～10	245～343	8	—	
		Y	0.5～10	295	—	—	
棒材	T2 T3	Y	5～40	275	5	10	GB/T 4423—1992
			>40～60	245	8	12	
			>60～80	210	13	16	
		M	5～80	200	35	40	
		R	30～120	186	30	40	GB/T 13808—1992
管材	T2 T3	Y	$D\leqslant 100$	315	—	—	GB/T 1527—1997
			$D>100$～360	295	—	—	
		Y_2	$D\leqslant 100$	235～345	—	—	
		M	3～360	205	35	49	
		R	D：30～300 S：5～30	186	35	42	GB/T 1528—1997

续表 4.2-20

品种	牌号	状态	δ 或 d/mm	σ_b/MPa	δ_{10}/%	δ_5/%	技术标准
				≥			
管材	T2	M	D：0.5～3.0 d：0.3～2.5	205	35		GB/T 1531—1994
		Y_2		245～370	—		
		Y		345	—		
线材①	T2 T3	M	0.1～0.3	196	15		GB/T 14953—1994
			>0.3～1.0	196	20		
			>1.0～2.5	205	25		
			>2.5～6.0	205	30		
		Y	0.1～2.5	380	—		
			>2.5～4.0	365	—		
			>4.0～6.0	365	—		
		Y_2	1.0～6.0	235	15		GB/T 14956—1994

① 线材 δ%的 L_0 = 100 mm。

表 4.2-21 技术标准规定的管材压扁和液压性能试验

状态	压扁试验	水压试验	技术标准
	试验条件及要求	试验条件及要求	
退火（Y 态退火温度 550～650℃ 1～2 h）	压扁后内壁距离等于壁厚，压扁后不应产生裂纹或裂口	用于压力下工作的管材 水压试验计算按下式进行： $p=\frac{2St}{D-0.8t}$ 持续时间 10～15 s，不应渗漏和永久变形	GB/T 1527—1997

注：p 为试验水压力，MPa；t 为管材壁厚，mm；D 为管材外径，mm；S 为材料的允许应力，MPa，纯铜的允许应力为 41.2 MPa。

表 4.2-22 技术标准规定的毛细管材气密性试验

外径和内径之差（2倍壁厚）/mm	气体压力/MPa			持续时间/s	试验要求	技术标准
	高级	较高级	普通级			
0.20～0.50 >0.50～0.70 >0.70～1.00 >1.00～1.80	— — 6.9 7.8	2.9 3.9 5.9 7.8	2.0 2.9 4.9 6.9	30～60	管材应不变形，不漏气	GB/T 1531—1994

表 4.2-23 技术标准规定的板材弯曲试验性能

牌 号	厚度/mm	弯曲角度	弯芯直径	试验要求	技术标准
T2 T3	≤5 >5	两面接触 两面平行	弯芯直径等于板材厚度	弯曲处不应有裂纹	GB/T 2040—2002

表 4.2-24 技术标准规定的带材、板材杯突试验要求

板材杯突试验（GB/T 2040—2002）				带材杯突试验（GB/T 2059—2000）			
状态	δ/mm	冲头半径/mm	杯突深度/mm ≥	状态	δ/mm	冲头半径/mm	杯突深度/mm ≥
冷轧板 δ ≤1.5mm	0.2～0.5	10	7	M	>0.13～0.18	4 （带材宽度<90 mm）	3.4
					>0.18～0.30		3.8
	>0.35～0.55		8		>0.30～0.60		4.0
					>0.13～0.18	10 （带材宽度≥90 mm）	7.5
	>0.55～1.15		9		>0.18～0.30		8.0

续表 4.2-24

板材杯突试验（GB/T 2040—2002）				带材杯突试验（GB/T 2059—2000）			
状态	δ/mm	冲头半径/mm	杯突深度/mm ≥	状态	δ/mm	冲头半径/mm	杯突深度/mm ≥
冷轧板 δ ≤1.5mm	>0.55~1.15	10	9	M	>0.30~0.60	10（带材宽度≥90 mm）	9.0
	>1.15~1.50		10		>0.60~1.20		9.5
					>1.20~1.50		10.0
					>1.50~2.00		11.0

表 4.2-25 普通纯铜的典型力学性能

性能	数值			性能	数值		
	加工铜	退火铜	铸造铜		加工铜	退火铜	铸造铜
弹性极限 σ_e/MPa	280~300	20~50	—	布氏硬度 HBS	110~130	35~45	40
屈服点 σ_s/MPa	340~350	50~70	—	抗剪强度 τ/MPa	210	150	—
抗拉强度 σ_b/MPa	370~420	220~240	170	冲击韧度 a_K/J·cm^{-2}	—	16~18	—
伸长率 δ/%	4~6	45~50	—	抗压强度 σ_y/MPa	—	—	157
断面收缩率 ψ/%	35~45	65~75	—	镦粗率 φ/%	—	—	65

表 4.2-26 普通纯铜在不同状态下的力学性能

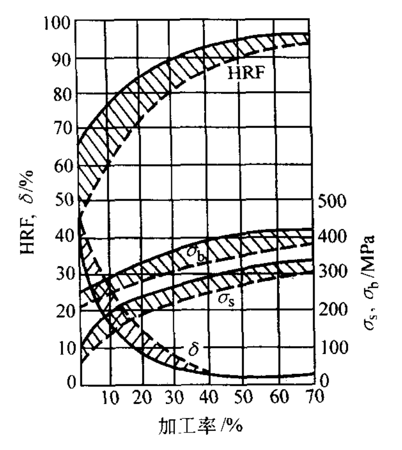
代号	铜含量/%	材料，状态	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%	断面收缩率 ψ/%	疲劳强度 σ_N/MPa	循环次数 $N/10^6$
T1	99.95	条材：软态	219	35	—	77	100
	99.95	冷加工 20%	310	8	—	91	100
	99.95	冷加工 50%	366	2	—	98	100
	99.96	棒材：700℃退火 30 分	203	60	—	87	30
	99.96（Fe、Ni、Sn 痕迹）	退火态	227	59	74	80	30
	99.98	700℃退火态	227	57	72	70	500
T2	99.92	棒材：600℃退火态	217	60	69	70	100
	99.92	冷拉态	252	32	84	122	30
	99.95（0.036% O_2）	冷拉态	262	30	73	120	50

表 4.2-27 加工用普通纯铜的高温拉伸性能

代号、成分及状态	温度 θ/℃	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%	断面收缩率 ψ/%	代号、成分及状态	温度 θ/℃	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%	断面收缩率 ψ/%
T_1，99.97% Cu，冷加工 25%	20	338	18	58	T_2，99.95% Cu－0.03% O_2，轧制和退火态	700	50	21	38
	150	294	15	60		800	35	17	33
	250	224	14	47		900	20	16	34
	375	107	54	72	T_2，板材，退火态	100	185	—	57
	500	62	58	94		204	160	—	57
	625	36	56	96	T_2，棒材，冷加工 21%	260	262	—	14
	750	22	52	98		316	241	—	14
	875	14	79	95		371	124	—	41
	1 000	8	77	100		426	103	—	36
T_2，99.95% Cu－0.03% O_2，轧制和退火态	20	215	52.2	70.5	T_2，棒材，冷加工 50%	300	275	—	13
	300	185	50	76.2		500	107	—	69
	450	150	40	56		600	68	—	71
	500	123	28	38		700	40	—	75
	600	75	17.5	37.3					

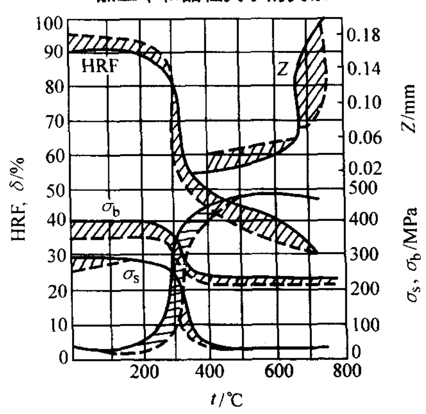
表 4.2-28　加工用普通纯铜的低温力学性能

代号	状态	温度 θ/℃	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服点 σ_S/MPa	伸长率 δ/%	断面收缩率 ψ/%
T1	99.985%Cu,退火态	20	220	60	48	76
		-10	224	62	40	78
		-40	236	64	47	77
		-80	270	70	47	74
		-120	288	75	45	70
		-180	408	80	58	77
T2	99.9%Cu,退火态	-40	240	76	53	60
		-68	255	76	55	55
		-196	345	76	58	52
	99.9%Cu,在800℃退火并水淬	17	240	—	29	70
		-196	380	—	41	72
		-253	460	—	48	74
T3	99.7%Cu,冷轧态	20	410	375	8.4	51.5
		-78	423	408	12	56.6
		-183	455	420	11.2	61.2
	热轧态	20	212	50	55	70
		-20	236	50	56.2	70
		-60	255	54	57.3	67
		-77	263	50	57.2	68
	750℃淬火态	20	271	175	37.5	77
		-253	310	214	60	75
	退火态	20	240	38	50.5	71.4
		-78	291	100	50	73.6
		-183	365	87	50.5	83.3
		18	230	51	52	70
		0	236	51	52	69
		-30	237	54	48	69
		-80	263	61	47	67
	冷拉 93%	20	468	—	1.1	57
		0	486	—	1.8	56
		-20	487	—	1.2	56
		-30	493	—	1.9	54
		-60	506	—	2.0	58
	冷拉 73%	20	411	—	2.0	57
		0	419	—	2.1	57
		-20	429	—	2.0	57
		-30	435	—	3.0	57
		-60	449	—	4.0	57



原材料：厚1 mm的软板材
—— 晶粒大小为0.015 mm的材料；
– – – 晶粒大小为0.040 mm的材料

图 4.2-7　T1铜（无氧的）的力学性能与加工率和晶粒大小的关系



原材料：厚1 mm的板材，加工率50%
—— 晶粒大小为0.015 mm的材料；
– – – 晶粒大小为0.040 mm的材料

图 4.2-8　T1铜（无氧的）的力学性能与退火温度（保温1 h）和原始晶粒大小的关系

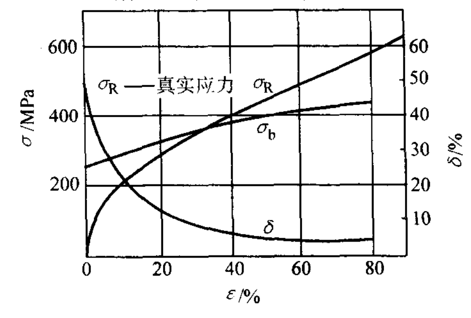
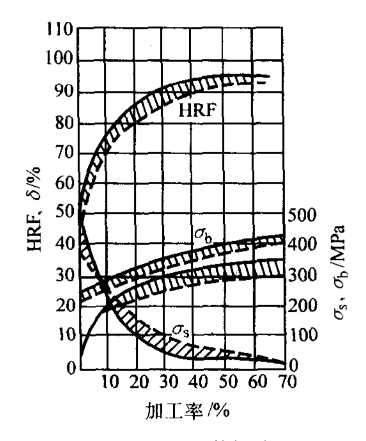


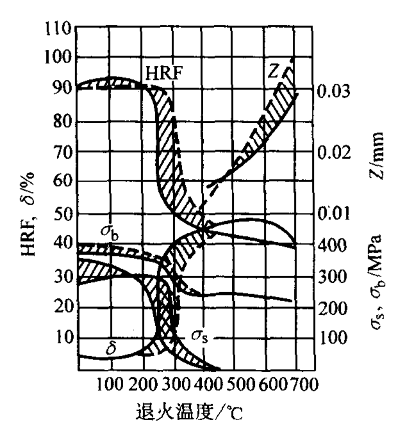
图 4.2-9　T2拉伸性能与变形率的关系

图 4.2-10　T2的拉伸性能与退火温度的关系



原材料：厚1 mm的软板材
—— 晶粒大小为0.015 mm的材料；
– – – 晶粒大小为0.045 mm的材料

图4.2-11 含0.5% Cu_2O 的T2铜的力学性能与加工率和晶粒大小的关系



原材料：厚1 mm的板材，加工率50%
—— 晶粒大小为0.015 mm的材料；
– – – 晶粒大小为0.045 mm的材料

图4.2-12 含0.5% Cu_2O 的T2铜的力学性能与退火温度（保温1 h）和晶粒大小的关系

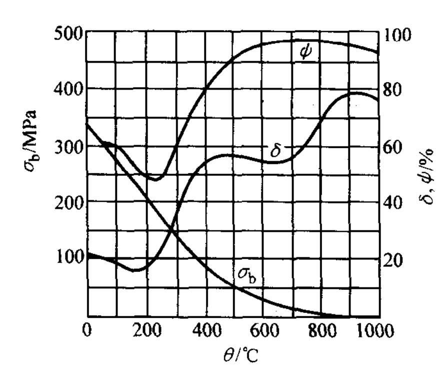
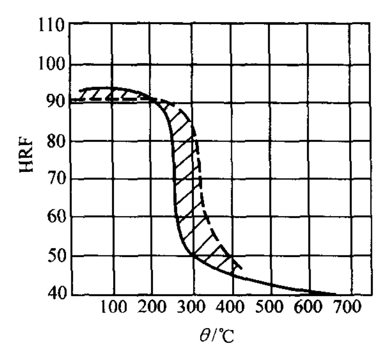


图4.2-13 T2铜（含0.04% O_2，99.93%Cu）的高温性能
原材料：ϕ25 mm的棒材，加工率25%

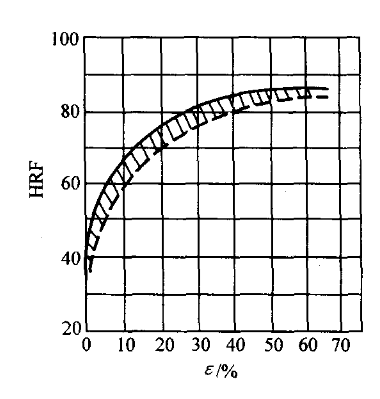
表4.2-29 不同温度的高温硬度值

温度 θ/℃	300	400	500	600
硬度 HB	46	17	9	7



原材料：厚度1 mm的板材硬态（变形率50%）
晶粒大小：—— 0.015 mm;
– – – 0.45 mm

图4.2-14 T2的硬度与退火温度（保温1 h）的关系



原材料：厚度1 mm的软板材
晶粒大小：—— 0.015 mm;
– – – 0.45 mm

图4.2-15 T2硬度与加工率的关系

3）拉伸性能 供应状态高导电纯铜的拉伸性能见表4.2-30。

表4.2-30 不同状态高导电纯铜的拉伸性能

品种	状态	σ_b/MPa			δ/%		
		min	max	$\bar{x}$	min	max	$\bar{x}$
带材	M	215	255	235	36	57	45
	Y	315	440	390	3	12	4
板材	M	215	245	230	30	63	50
	Y_2	265	360	315	3	14	7
	Y	295	390	345	2.2	17	4.5
管材	M	215	440	250	36	60	48
	Y	315	490	395	—	—	—
	R	195	225	215	39	49	42
棒材	M	205	235	215	30	48	41
	Y	290	360	320	6	13	8
	R	205	235	220	41	51	45
线材	M	205	265	240	21	53	47
	Y	380	490	435	1.5	3.0	2

4）压缩性能 抗压强度 σ_{bc} = 1 471 MPa（M态棒材）。

5）冲击性能 冲击韧度 a_{KU} = 1 560 ~ 1 760 kJ/m^2（M态棒材）。

6）扭转和剪切性能　抗剪强度 $\tau=150$ MPa（M态）；$\tau=210$ MPa（Y态）。

7）耐磨性能　摩擦因数 $\mu=0.011$（有润滑的）；$\mu=0.40$（无润滑的）。

8）持久和蠕变性能　硬态T2棒100℃时的持久强度 $\sigma_{100}^{100}=98$ MPa。各种状态铜的蠕变断裂性能见表4.2-31。

表4.2-31　铜的蠕变断裂性能

状态	试验温度/℃	应力/MPa	试验时间/h	总伸长率①/%	截距/%	最小蠕变速度/10^{-2}（1 000 h）$^{-1}$
带材，厚度2.5 mm						
OS030	130	55	2 500	2.6	2.0	0.15
		100	2 600	10.0	7.6	1.2
		140	170	29.8②	—	39
	175	55	2 000	3.3	2.3	0.65
		100	350	15②	8.0	6.3
H01	130	55	8250	0.20	0.15	0.01
		100	8 600	0.67	0.26	0.042
		140	1 750	2.4②	0.32	0.45
	175	55	6 850	1.14	0.14	0.088
		100	1 100	2.0	0.22	0.66
H02	130	55	7 200	0.24	0.13	0.01
		100	8 600	1.02	0.25	0.04
		140	4 680	3.4②	0.36	0.27
	175	55	1 050	3.3②	—	0.6
H06	130	55	8 250	1.58	0.08	0.035
		100	8 700	7.31	0.16	0.055
		140	4 030	11②	0.24	0.17
棒材，直径3.2 mm						
OS025	260	2.5	6 000	0.08	0.016	0.011
		4.1	6 000	0.189	0.010	0.030
		7.2	6 500	0.64	0.113	0.080
		13.8	6 500	2.88	0.87	0.306
H08	205	7.2	6 500	0.06	0.045	0.011
		14.5	6 500	0.20	0.112	0.012
		28	6 500	1.08	0.41	0.097
		50	6 500	5.42	2.47	0.44

注：表中数值表示各等级韧铜的典型数据。无氧铜、磷脱氧铜和含砷铜的抗蠕变形能力增大。

① 总延伸等于初始延伸（表中未给出）+截距（第六列）+最小蠕变速度（第七列）与试验时间（第四列）的乘积。

② 断裂试验。O为退火或再结晶状态，H为冷加工硬化状态。

9）疲劳性能　疲劳强度极限见表4.2-32。

表4.2-32　疲劳强度极限

品种	状态	循环次数/周	σ_D/MPa	品种	状态	循环次数/周	σ_D/MPa
T2棒	M	10^8	80	T2板	M	10^8	76
	Y	10^8	90		Y	10^8	90
					T	10^8	97

10）弹性性能　弹性模量 $E=107.9$ GPa（M态棒材），$E=117.7$ GPa（Y态棒材）。切变模量 $G=44.1$ GPa（M态棒材）。泊松比 $\mu=0.35$（M态棒材）。

美国纯铜典型的力学性能见表4.2-33～表4.2-35，图4.2-15～图4.2-21。

表4.2-33　C11000的典型力学性能

状态	抗拉强度/MPa	屈服强度①/MPa	标距50 mm时的伸长率/%	硬度			抗剪强度/MPa	疲劳强度②/MPa
				HRF	HRB	HR30T		
板带材，厚度1 mm								
OS050	220	69	45	40	—	—	150	—
OS025	235	76	45	45	—	—	160	76
H00	250	195	30	60	10	25	170	—
H01	260	205	25	70	25	36	170	—
H02	290	250	14	84	40	50	180	90
H04	345	310	6	90	50	57	195	90
H08	380	345	4	94	60	63	200	97
H10	395	365	4	95	62	64	200	—
M20	235	69	45	45	—	—	160	—
板带材，厚度6 mm								
OS050	220	69	50	40	—	—	150	—
H00	250	195	40	60	10	—	170	—
H01	260	205	35	70	25	—	170	—
H04	345	310	12	90	50	—	195	—
M20	220	69	50	40	—	—	150	—
板带材，厚度25 mm								
H04	310	275	20	85	45	—	180	—
棒材，直径6 mm								
H80（40%）	380	345	10	94	60	—	200	—
棒材，直径25 mm								
OS050	220	69	55	40	—	—	150	—
H80（35%）	330	305	16	87	47	—	185	115③
M20	220	69	55	40	—	—	150	—
棒材，直径50 mm								
H80（16%）	310	275	20	85	45	—	180	—
线材，直径2 mm（0.08 in）								
OS050	250	—	35④	—	—	—	65	—
H04	380	—	1.5⑤	—	—	—	200	—
H08	455	—	1.5⑤	—	—	—	230	—
管材，直径25 mm×壁厚1.65 mm								
OS050	220	69	45	40	—	—	150	—
OS025	235	76	45	45	—	—	160	—
H55（15%）	275	220	25	77	35	45	180	—
H80（40%）	380	345	8	95	60	63	200	—

续表 4.2-33

状态	抗拉强度/MPa	屈服强度①/MPa	标距50 mm时的伸长率/%	硬度			抗剪强度/MPa	疲劳强度②/MPa
				HRF	HRB	HR30T		
型材，断面尺寸 13 mm								
OS050	220	69	50	40	—	—	150	—
H80（30%）	275	220	30	—	35	—	180	—
M20	220	69	50	40	—	—	150	—
M30	220	69	50	40	—	—	150	—

① 在负载下延伸0.5%。
② 反复弯曲次数为 10^8 时。
③ 旋转试验循环次数为 3×10^8 时。
④ 250 mm 标距的延伸率。
⑤ 1 500 mm 标距时的伸长率。

表 4.2-34　C11000 的典型冲击吸收功

产品及状态	冲击吸收功/J	产品及状态	冲击吸收功/J
夏氏V形缺口		悬臂梁式冲击试验	
热轧、退火	96	棒材	
夏氏钥孔形缺口		退火和冷拔30%	54
铸造状态	11	冷拔30%	45
热轧状态	43	厚板	
棒材		热轧状态	52
		退火	53①
退火	52		39②
		冷轧50%	26①
商品状态	35		12②

① 与轧制方向平行。
② 与轧制方向垂直。

表 4.2-35　C12500 的典型力学性能

状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa		标距50 mm时的伸长率/%	硬度			抗剪强度/MPa
		载荷下延伸0.5%	残余变形0.2%		HRF	HRB	HR30T	
板带材，厚度 1 mm								
OS050	235	76	—	45	45	—	—	160
H00	250	195	235	30	60	10	25	170
H01	260	205	25	70	25	36	170	170
H02	290	250	270	14	84	40	50	180
H04	345	310	327	6	90	50	57	195
H08	380	345	360	4	94	60	63	200
H10	395	365	370	4	95	62	64	200
M20	235	69	—	45	45	—	—	160
棒材，直径 25 mm								
OS050	220	69	—	55	40	—	—	150
H80(35%)	330	305	—	16	87	47	—	185
M20	220	69	—	55	40	—	—	150

续表 4.2-35

状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa		标距50 mm时的伸长率/%	硬度			抗剪强度/MPa
		载荷下延伸0.5%	残余变形0.2%		HRF	HRB	HR30T	
线材，直径 2 mm								
OS050	240	—	—	35①	—	—	—	165
H04	380	—	—	1.5②	—	—	—	200
H08	455	—	—	1.5②	—	—	—	230
型材，直径 13 mm								
OS050	220	69	—	50	40	—	—	150
H80(15%)	275	220	—	30	—	35	—	180
M20	220	69	—	50	40	—	—	150
M30	220	69	—	50	40	—	—	150

① 标距 250 mm 伸长率。
② 标距 1 500 mm 伸长率。

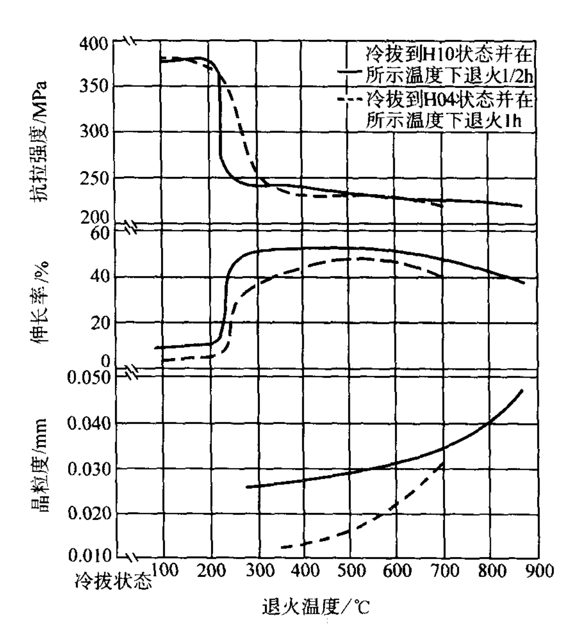


图 4.2-16　纯铜 C11000 及同类铜的抗拉性能及晶粒度与退火温度的关系

1.5　工艺性能

1）熔炼与铸造工艺　纯铜可采用反射炉熔炼或工频有芯感应电炉熔炼。反射炉熔炼时，通过氧化、还原精炼工艺，可获得致密的铸锭。采用铁模或铜模浇铸，也可经保温炉采用半连续或连续铸造。工频有芯感应电炉熔炼多采用硅砂炉衬。由于纯铜吸气性强，熔炼过程应尽可能减少气体来源，并使用经煅烧过的木炭作覆盖熔剂，也可添加微量磷作脱氧剂。浇铸过程在煤气或氮气保护或烟灰覆盖下，采用半连续铸造工艺浇铸铸锭。建议铸造温度为 1 150 ~ 1 230℃；线收缩率为 2.1%。

2）成形性能　纯铜有极好的冷、热加工性能，能用各种传统的压力加工工艺加工，如拉伸、压延、深冲、弯曲、精压和旋压等。热加工时应控制加热介质气氛，使呈微氧化性。热加工温度为 800 ~ 950℃。

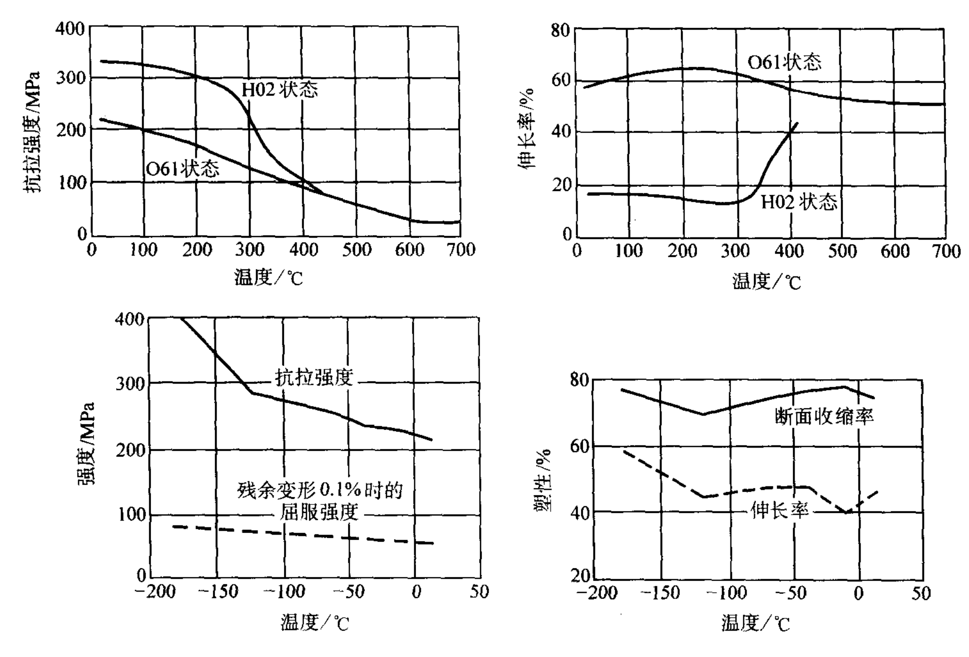


图4.2-17　C11000型纯铜的高温力学性能

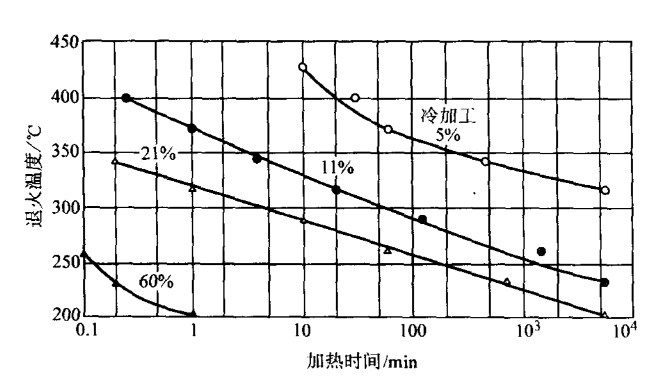


图4.2-18　C11000型纯铜的退火温度-时间曲线

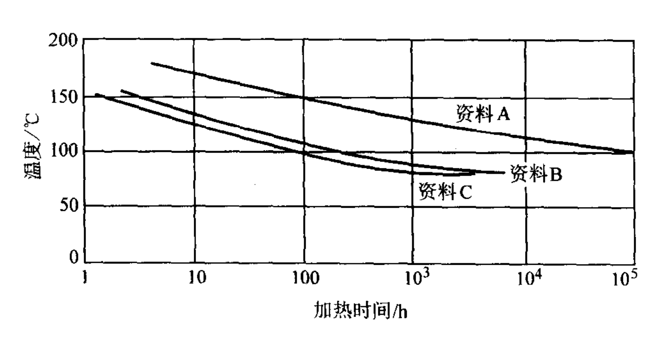


图4.2-21　C11000型纯铜的应力松弛特性

（表示抗拉强度降低5%所需的时间-温度关系）

材料：直径2 mm的H80状态线材

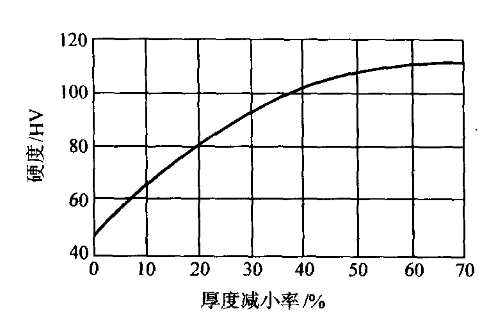


图4.2-19　C11000型纯铜的HV硬度与加工率（厚度减小率）的关系

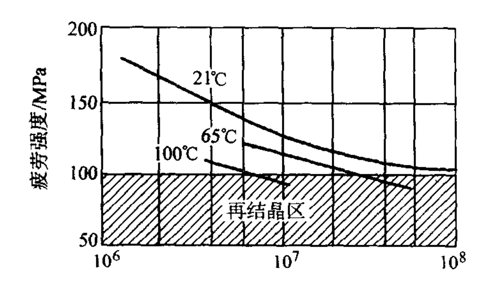


图4.2-20　直径2 mm的H80状态的C11000纯铜的疲劳强度

3）焊接性能　纯铜易于锡焊、铜焊，也能进行气体保护电弧焊、闪光焊、电子束焊和气焊，但不宜进行接触点焊、对焊和埋弧焊。C11000软钎焊优，硬钎焊和电阻焊良，气体保护电弧焊中；C12500用铜铆钉铆接，压焊，软钎焊优，可采用银焊、气体保护弧焊，宜采用填充金属。

4）表面处理工艺

酸洗　硫酸-重铬酸钠水溶液，温度为40~80℃。

钝化　硫酸（30 g/L）-铬酐（90 g/L）混合液，于室温浸渍。

5）切削加工与磨削性能　纯铜的切削加工性为易切削黄铜C36000（HPb63-3）的20%。

6）锻造性能　C11000的可锻性为锻造黄铜C37700的65%。

1.6　选材与应用实例

普通纯铜T1、T2广泛用作导电、导热、耐蚀器材。如电线、电缆、导电螺钉、爆破用雷管、化工用蒸发器、贮藏器及各种管道等。

T3用作一般铜材，如电气开关、垫圈、垫片、铆钉、管嘴、油管及其他管道等。

C11000除标准圆管外，其他材料可用作：建筑物正面装饰、密封垫片、汽车水箱、母线、电线电缆、绞线、触点、无线电元件、开关、接线柱、浮球、铰链、扁销、钉子、铆钉、烙铁、平头钉、化工设备、铜壶、锅、印刷滚

筒、膨胀板、容器。在还原气氛中加热到370℃以上，例如在退火、硬钎焊或焊接时，材料会变脆。若还原气氛中有氢或CO存在会加速脆化。

C12500可用作建筑：正面板、落水管、防雨板、流槽、屋顶材料、网、流道。汽车：密封圈、水箱。电工：汇流排、触点、无线电元件、整流器扇形片、开关、端子。其他：化工设备、釜、锅、印染辊、旋转带、路基膨胀板、容器。在370℃以上退火、硬钎焊或焊接时若为还原性气氛易发脆，如有 H_2 或CO存在则加速脆化。

此外，在工业生产中，普通纯铜板带材经常存在织构和各向异性，取样冲压时，会出现“制耳”现象。存在“制耳”的产品成品率低，而且还可能产生裂缝，影响使用寿命，为将制耳率降低，可采用以下措施。

1）控制最后冷轧加工率不超过60%，冷轧前退火温度在700℃左右，冷轧后的最终退火温度在550~600℃（对1.0 mm厚的铜板）。

2）当冷轧加工率不大（约50%）时，冷轧前可在较宽的温度范围内退火，也不影响紫铜板、带力学性能的均匀性；当冷轧加工率较大（70%~80%）时，则冷轧前的退火温度范围缩小至550~600℃，方可获得均一的力学性能。最终退火的温度比冷轧加工率和冷轧前退火温度对紫铜板、带各向异性的影响要小，提高最终退火温度，将增加紫铜板、带力学性能的各向异性。

3）取消中间退火，采用大的冷轧加工率（如大于95%），并选择合理的最终退火工艺，可使紫铜板、带获得较好的“伪各向同性”，从而在深冲时得到杯口较齐的制品。例如，在850~920℃将厚172 mm的T2铜锭快速热轧至厚12 mm（终轧温度为650~720℃），热轧坯铣面后（铣成11.5 mm厚），不经中间退火，连续冷轧至厚0.25 mm（加工率达97.8%），再于280~360℃最终退火，材料具有并存的（100）[001] 再结晶织构和（110）[$1\bar{1}2$]+（112）[111] 变形织构。这种由多种织构叠加的料，其方向性已相互抵消，经深冲和力学性能试验，证明完全可用作雷管制品。对加工率为99.4%或95.6%的板材，经适当温度退火后，均可得到满意的结果。

普通纯铜的品种规格与供应状态见表4.2-36。

表4.2-36　不同品种规格与供应状态

牌号	品种		δ 或 d/mm	供应状态
T2、T3	带材		0.05~2.0	M，Y_2，Y
	板材	热轧板	4~60	R
		冷轧板	0.2~10	M，Y_2，Y
	棒材	拉制棒	5~80	Y，M
		挤制棒	30~120	R
	管材		D：3~360　S：0.5~10	Y，M
			D：3~100　S：0.5~10	Y_2
			D：30~300　S：5~30	R
T2	毛细管		D：0.5~3.0　d：0.3~2.5	M，Y
	散热扁管		宽度：16~22 高度：22~6 壁厚：0.2~0.7	Y
	换热器管		D：5.0~16.0　S：0.30~0.80	M，Y_2，Y
	波导管		矩形、中等扁矩形、扁矩形、方形	Y
T2、T3	线材		0.02~6	M，Y
	专用线材		1~6	Y_2

2　磷脱氧铜

磷脱氧铜是以元素磷精炼并残留微量磷的铜。由于磷强烈地降低铜的导电性，因此磷脱氧铜通常作为结构材料使用，若作为导体，则应选用低残留磷的脱氧铜。一般条件下无“氢脆性”，可以在还原性气氛条件下加工和使用，但不宜在高温氧化条件下加工和使用。

磷在铜中的最大溶解度（714℃共晶温度时）为1.75%，200℃时为0.4%，室温时几乎为零。磷能提高铜熔体的流动性，对铜的力学性能尤其是焊接性能有良好的影响。但能显著降低铜的导电性和导热性，对与玻璃直接封结的电真空用无氧铜，则要求含磷量极低（一般要求P含量小于0.000 8%；最好不大于0.000 3%）；否则，经涂硼氧化处理后，所生氧化膜极易剥落，会引起电子管漏气。

磷脱氧铜具有良好的导热、耐蚀性和优良的加工性，易于承受精冲、拉伸、镦铆、挤压、缠绕、深冲、热锻和焊接等加工。该合金主要用做各种供油、供水的管道，深冲件和焊接件等。

磷脱氧铜牌号见表4.2-37。

表4.2-37　磷脱氧铜牌号

国别	GB（中国）	ISO	ASTM（美国）	JIS（日本）	ГОСТ（俄罗斯）	DIN（德国）	BS（英国）	NF（法国）
牌号	TP1 TP2	Cu-DLP Cu-DHP	C12000 C12200 C12300	C1201 C1220 C1221	M1р M1ф	SW-Cu SF-Cu	— C106	Cu-b2 Cu-b1

2.1　化学成分

按GB/T 5231—2001规定，磷脱氧铜的化学成分见表4.2-38。

表4.2-38　磷脱氧铜的化学成分　　%

名称	牌号	Cu+Ag	P	杂质总和
一号脱氧铜	TP1（C12000）	99.90	0.004~0.012	0.10
二号脱氧铜	TP2（C12200）	99.90	0.015~0.040	0.10

2.2　物理及化学性能

1）热性能　熔化温度范围：1 065~1 083℃；比热容：385.2 J/（kg·K）；线胀系数：$\alpha_1 = 16.92 \times 10^{-6}\,K^{-1}$（20~100℃），$17.28 \times 10^{-6}\,K^{-1}$（20~200℃），$17.64 \times 10^{-6}\,K^{-1}$（20~300℃）；热导率：$\lambda = 363.3$ W/（m·K）（TP1），339.2 W/（m·K）（TP2），磷显著降低铜的导热性，不同磷含量的磷脱氧铜热导率见表4.2-39。

表4.2-39　磷对铜的热导率 λ 的影响

磷含量/%	0.020	0.042	0.075	0.239
热导率 λ/W·（m·K）$^{-1}$	340.20	305.34	239.40	142.80

2）质量特性　含磷0.02%的磷脱氧铜密度为 $\rho = 8.94$ g/cm^3，不同磷含量对铜密度的影响见表4.2-40。

3）电性能　电导率：$g = 90.2\%$ IACS（TP1）；$g = 85.0\%$ IACS（TP2）。

电阻率：$\rho = 0.019\,1\ \mu\Omega\cdot m$（TP1）；$\rho = 0.020\,3\ \mu\Omega\cdot m$（TP2）。

不同磷含量对铜电导率的影响见表4.2-40，磷脱氧铜电导率与断面收缩率的关系及其电阻率与压缩应力的关系见图4.2-22。

表 4.2-40 磷对铜的性能影响

磷含量 /%	抗拉强度 /MPa	伸长率 /%	断面收缩率 /%	电导率 /%IACS	密度 /$g\cdot cm^{-3}$	疲劳强度 (2×10^7) /MPa
0.014	242	62	73	94.3	8.920	77
0.030	225	59	82	78.2	8.910	84
0.045	228	50	86	72.4	8.920	87
0.096	232	62	80	55.5	8.920	99
0.148	239	63	85	45.2	8.920	105
0.178	246	61	85	42.5	8.900	92
0.254	249	63	84	33.1	8.900	94
0.494	270	62	90	19.7	8.870	108
0.690	270	63	84	15.5	8.860	115
0.790	281	64	81	14.0	8.840	123
0.950	281	66	85	11.6	8.820	120

4）磁性能 铜具有抗磁性，室温质量磁化率 $\chi = -0.085\times10^{-6}\ m^3/kg$。

5）化学性能 高温抗氧化性能较差。磷脱氧铜在室温大气、淡水和海水中具有耐蚀性，也能耐冷或热稀硫酸，冷浓硫酸的侵蚀。但在硫和硫化物、氨和氨溶液中腐蚀速度较快，且易被硝酸腐蚀。

磷脱氧铜具有优良的生物腐蚀抗力，是用于海洋环境中的最佳材料之一，因为在海水中铜的部件表面存在少量铜离子，这些铜离子有效地阻碍了海洋生物的附着。

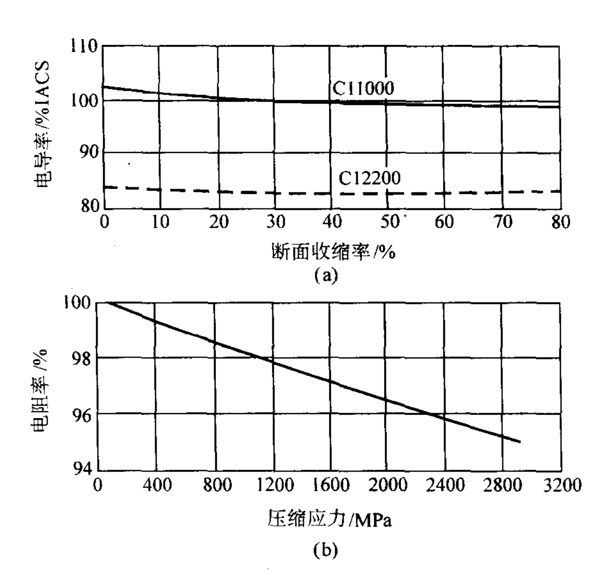


图 4.2-22 磷脱氧铜的电导率与断面收缩率的关系（a）及其电阻率（以无载荷时的电阻率为 100%）与压缩应力的关系（b）

2.3 热加工与热处理规范

退火温度：400～650℃；热加工温度：800～900℃。

2.4 力学性能

1）技术标准规定的力学性能见表 4.2-41。

表 4.2-41 磷脱氧铜技术标准规定的力学性能

品 种	状 态	δ，d 或 $D\times S$/mm	σ_b/MPa	伸长率/% δ_{10} ≥	伸长率/% δ_5 ≥	技术标准
带 材	M	0.5～2.0	206	30	—	GB/T 2059—2000
	Y_2		245～343	8	—	
	Y		294	3	—	
板 材	R	4～14	196	30	—	GB/T 2040—2002
	M	0.5～10	196	32	—	
	Y_2		245～343	8	—	
	Y		295	—	—	
棒 材（TP2）	R	16～120	—	—	—	GB/T 13808—1992
	Y	5～80	—	—	—	GB/T 4423—1992
拉制铜管	M	（3～360）×（0.5～10）	206	35	40	GB/T 1527—1997
	Y_2	≤100×（0.5～10）	235～343	—	—	
	Y	≤100×（0.5～10）	314	—	—	
		（>100～360）×（0.5～10）	294	—	—	
挤制铜管（TP2）	R	（30～300）×（5～30）	186	35	42	GB/T 1528—1997
毛细管	M	ϕ（0.5～3.0）×ϕ（0.3～2.5）	205	35	—	GB/T 1531—1994
	Y_2		245～370	—	—	
	Y		345	—	—	
换热器铜管（TP2）	M	（5～10）×（0.3～0.8）	206	40	—	YS/T 288—1994
	Y_2		245～314	—	—	
	Y		294	—	—	

2）各种状态下磷脱氧铜的力学性能见表 4.2-42 ~ 表 4.2-44，图 4.2-23 ~ 图 4.2-25。

表 4.2-42　磷脱氧铜的典型力学性能

代号	铜含量/%	材料，状态	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%	断面收缩率 ψ/%
TP	99.9—0.02%P	管材：退火态	233	53	—
	99.93—0.05%P	退火态	244	53.6	70

表 4.2-43　软态 TP2 板材的低温拉伸性能

θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{P0.5}$/MPa	δ/%
-40	240	80	55
-68	260	82	57
-196	345	90	66

表 4.2-44　加工用磷脱氧铜的高温力学性能

牌号、成分及状态	温度 /℃	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%	断面收缩率 ψ/%
TP，99.9% Cu - 0.02% P，退火的	20	233	53	—
	100	202	53	—
	200	176	54	—
	300	151	54	—
TP，99.93% Cu - 0.05% P，退火的	20	244	53.6	70
	300	189	41.8	73.8
	400	168	41.3	78.5
	500	129	41.6	83
	600	105	39.5	92
	700	47.3	41.6	95.6
	800	37.8	41.4	99.3
	900	15.4	38.6	99.7

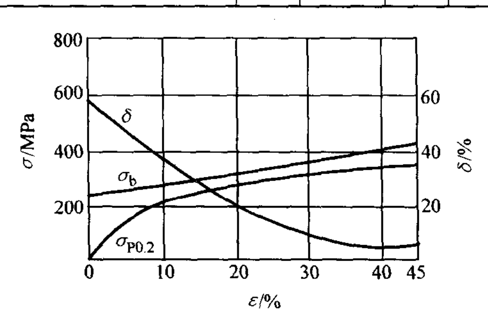


图 4.2-23　TP2 的拉伸性能与变形率的关系

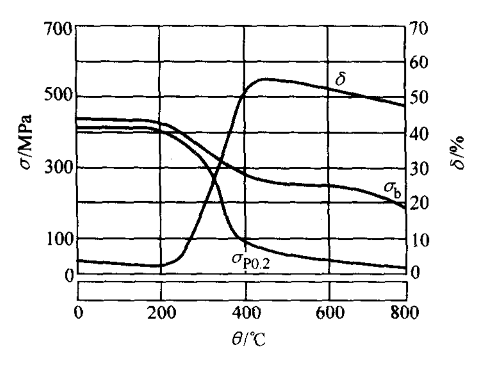


图 4.2-24　TP2 的拉伸性能与退火温度（保温 2 h）的关系

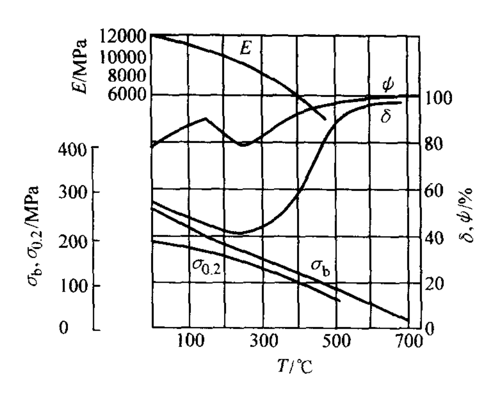


图 4.2-25　TP 的高温力学性能

原材料：冷轧条件

3）硬度　供应状态材料的硬度见表 4.2-45。材料的硬度同变形率的关系见图 4.2-26。不同温度退火后材料的硬度见图 4.2-27。

表 4.2-45　供应状态磷脱氧铜的硬度

状态	M	Y_2	Y
HRF	40 ~ 45	77	90 ~ 95

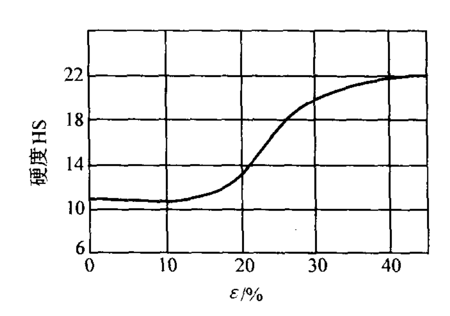


图 4.2-26　TP2 的硬度与变形率的关系

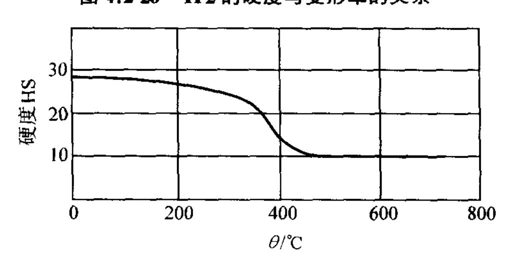


图 4.2-27　TP2 的硬度与退火温度（保温 2 h）的关系

4）拉伸性能　磷脱氧铜供应状态的拉伸性能见表 4.2-46。

表 4.2-46　磷脱氧铜供应状态的拉伸性能

品种	状态	σ_b/MPa			δ/%		
		$\bar{x}$	min	max	$\bar{x}$	min	max
带材	Y	385	310	460	5.5	—	—
板材		370	335	410	5	2	10
管材	Y	295	—	—	—	—	—
	M	254	—	—	52	—	—

5）冲击性能　冲击韧度 a_{KU} = 1 670 ~ 1 760 kJ/m^2。

6）扭转和剪切性能　抗剪强度见表 4.2-47。

7）持久和蠕变性能　软态 TP2 板的高温持久性能见表 4.2-48。

表 4.2-47 磷脱氧铜抗剪强度

状态	M	Y_2	Y
τ/MPa	151	179	200

表 4.2-48 软态 TP2 板材高温持久性能

θ/℃	σ_{1000}/MPa	σ_{10000}/MPa	σ_{30000}/MPa	σ_{100000}①/MPa	θ/℃	σ_{1000}/MPa	σ_{10000}/MPa	σ_{30000}/MPa	σ_{100000}①/MPa
100	195	180	170	160	200	130	110	92	71
150	170	150	140	120	250	110	78	60	38

① σ_{100000}系据曲线外推值。

软态 TP2 板材的高温蠕变性能见表 4.2-49。

表 4.2-49 软态 TP2 板材高温蠕变性能

θ/℃	$\sigma_{1/1000}$/MPa	$\sigma_{1/10000}$/MPa	$\sigma_{1/30000}$/MPa	$\sigma_{1/100000}$①/MPa	θ/℃	$\sigma_{1/1000}$/MPa	$\sigma_{1/10000}$/MPa	$\sigma_{1/30000}$/MPa	$\sigma_{1/100000}$①/MPa
100	62	59	55	52	200	50	41	39	30
150	60	52	50	44	250	42	33	28	21

① $\sigma_{1/100000}$系据曲线外推值。

8）应力松弛特性 见表 4.2-50。

表 4.2-50 C12000 铜线的拉伸应力松弛特性

材料	状态	试验时间/h	温度/℃	初始应力/MPa	经如下时间后残余应力量/%	
					10 000 h	40 a
C12000，镀锡	061	10 000	27	52.4	86	80
		10 000	27	77.9	85	79
		10 000	27	104	84	78

9）疲劳性能 不同状态材料的疲劳强度极限见表 4.2-51。

表 4.2-51 磷脱氧铜不同状态下疲劳强度极限

牌号及品种	TP1 板材				TP2 棒材		
状态	M	Y_2	Y	T	M	Y_2	T
N/周	10^8				2×10^7		
σ_D/MPa	76	90	90	97	70	97	130

10）弹性性能 弹性模量 $E=117.2$ GPa。切变模量 $G=44.2$ GPa。

2.5 工艺性能

1）熔炼与铸造工艺 磷脱氧铜通常使用工频有芯感应电炉熔炼。高温下纯铜吸气性强，熔炼时尽可能减少气体来源，并使用经煅烧过的木炭覆盖和添加适量的磷铜脱氧。采用煤气保护或氮气保护或烟灰覆盖下的半连续铸造工艺浇注铸锭，铸造温度为 1 150～1 180℃。

脱氧铜在浇铸过程中，如不用保护气氛，仍可吸收 0.01%氧。

2）成形性能 磷脱氧铜有优良的冷、热加工性能，可以进行精冲、拉伸、镦铆、挤压、弯曲、缠绕、深冲、旋压以及热挤、热轧和热锻等加工。磷为表面活性元素，易吸附在铜的晶界上，使得磷脱氧铜在 400～600℃呈热脆性，因此热加工宜在 800～900℃进行。

3）焊接性能 易于熔焊、钎焊、气体保护电弧焊和炭弧焊，但不宜进行电阻对缝焊。

4）切削加工与磨削性能 磷脱氧铜的切削加工性为易切削黄铜 HPb63-3 的 20%。

2.6 选材与应用实例

磷脱氧铜工艺性能好，焊接性能、冷弯性能好，一般无“氢病”，可在还原气氛中加工使用，但不能在氧化气氛中加工使用。该合金主要以管材应用，也可以板、条供应。主要用做燃油系统、空气限制器、热交换器和泵的管道以及其他深冲和焊接制件，典型用途包括：汽油、气体供应管，排水管，冷凝管，水雷用管，冷凝器，燃气加热器和燃油烧嘴用管，卫生工程管道，驱动带用管，蒸发器和热交换器用管，火车箱零件等。主要的品种规格和供应状态见表 4.2-52。

表 4.2-52 磷脱氧铜品种规格和供应状态

品 种	δ, d 或 $D\times S$/mm	供应状态	技术标准
带 材	0.05～2.0	M，Y_2，Y	GB/T 2059—2000
板 材	4～60	R	GB/T 2040—2002
	0.2～10.0	M，Y_2，Y	
棒 材（TP2）	16～20	R	GB/T 13808—1992
	5～80	M，Y	GB/T 4423—1992
拉制铜管	(3～360)×(0.5～10)	M	GB/T 1527—1997
	(3～100)×(0.5～10)	Y_2	
	(3～360)×(0.5～10)	Y	
挤制铜管(TP2)	(30～300)×(5～30)	R	GB/T 1528—1997
换热器铜管（TP2）	(5～10)×(0.3～0.8)	M，Y_2，Y	YS/T 288—1994
毛细管(TP2)	$\phi(0.3\sim3.0)\times\phi(0.3\sim2.5)$	M，Y_2，Y	GB/T 1531—1994

3 无氧铜

1 号、2 号无氧铜 TU1、TU2 是含氧量极少的铜，具有纯度高、导电、导热性高的特点，无“氢病”或极少“氢病”。含磷量（质量分数）极低（如 P<0.000 8%或 P≥0.000 3%的无氧铜，与玻璃封结性好，加工性能、焊接性、耐蚀性、耐寒性均好。

无氧铜主要用于电真空仪器仪表用零件，包括汇流排、导电条、波导管、同轴电缆、真空密封件、真空管、晶体管的部件等。

常用的无氧铜牌号见表 4.2-53。

表 4.2-53 无氧铜牌号

国别	GB（中国）	ISO	ASTM（美国）	JIS（日本）	POCT（俄罗斯）	DIN（德国）	BS（英国）	NF（法国）
牌号	TU0、TU1	Cu-OFE	C10100	C1011	M00Б $MO_б$	—	C103	Cu-C2
	TU2	Cu-OF	C10200	C1020	M00Б $M1_б$	OF-Cu	C110	Cu-C1

3.1　化学成分

按GB/T 5231—2001规定，无氧铜的化学成分见表4.2-54。

表4.2-54　无氧铜化学成分①（质量分数）（摘自GB/T 5231—2001）　%

名称	牌号	Cu	P	Ag	Bi②	Sb②	As②	Fe	Ni	Pb	Sn	S	Zn	O	杂质总和
零号无氧铜	TU0③（C10100）	99.99	0.000 3	0.002 5	0.000 1	0.000 4	0.000 5	0.001 0	0.001 0	0.000 5	0.000 2	0.001 5	0.000 1	0.000 5	0.01
						Se：0.000 3　Te：0.000 2　Mn：0.000 05　Cd：0.000 1									
一号无氧铜	TU1	99.97	0.002	—	0.001	0.002	0.002	0.004	0.002	0.003	0.002	0.004	0.003	0.002	0.03
二号无氧铜	TU2	99.97	0.002	—	0.001	0.002	0.002	0.004	0.002	0.004	0.002	0.004	0.003	0.003	0.05

① 经双方协商，可限制表中未规定的元素或要求严加限制表中规定的元素。

② 砷、铋、锑可不分析，但供方必须保证不大于界限值。

③ TU0［C10100］铜量为差减法所得。

3.2　物理及化学性能

1）热性能　熔点：1 082.5～1 083℃；热导率：20℃时为 $\lambda = 391$ W/（m·K）；比热容：20℃时为385 J/（kg·K）；线胀系数见表4.2-55。

表4.2-55　无氧铜线胀系数

θ/℃	TP1，TP2	20～100	20～200	20～300
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	C10100	16.92	17.28	17.60
	C10200	17.0	17.3	17.7

2）质量特性　无氧铜20℃时，凝固时的收缩率4.92%，密度为 $\rho = 8.94$ g/cm³。

3）电性能　20℃时电导率 $g = 101.4\%$ IACS（700℃退火30 min后测定）。电阻率 $\rho = 0.017\ 1\ \mu\Omega\cdot m$。

4）磁性能　无氧铜为抗磁性，室温质量磁化率 $\chi = -0.085 \times 10^{-6}\ m^3/kg$。

5）化学性能

① 抗氧化性能　铜在高温时氧化速度显著提高，在大气中，于室温下即缓慢氧化。无氧铜在空气中退火，渗氧深度与退火温度及时间的关系见图4.2-28。

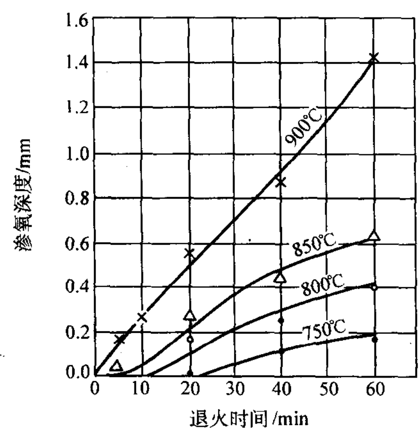


图4.2-28　在空气中无氧铜渗氧深度与退火温度、时间的关系

② 耐腐蚀性能　无氧铜在大气、纯净淡水、流速不大的海水中均耐腐蚀，对非氧化性酸类也有良好的抗力，但对氧化性酸类、湿氨、湿卤素、硫化物和含铵离子溶液抗腐蚀性很低。

3.3　热加工与热处理规范

退火温度为375～650℃；热加工温度为750～875℃。

3.4　力学性能

（1）技术标准规定的性能

无氧铜技术标准规定的拉伸性能见表4.2-56。

根据GB/T 14953—1994规定，线材反复弯曲性能试验标准为：直径≥0.3 mm的线材在氢气退火后作反复弯曲试验，弯曲次数不少于10次。

表4.2-56　无氧铜技术标准规定的拉伸性能

品种	牌号	状态	σ_b/MPa	δ_{10}/%	技术标准
			≥		
δ>0.3 mm的板、带材	TU1	M	196	35	GB/T 14594—1993
	TU2	Y	275	—	

（2）室温及各种温度下的力学性能

1）无氧铜典型的力学性能见表4.2-57。

表4.2-57　C10100及C10200纯铜的典型力学性能

状态	抗拉强度/MPa	屈服强度①/MPa	标距50 mm时的伸长率/%	硬度 HRF	硬度 HRB	硬度 HR30T	抗剪强度/MPa	疲劳强度②/MPa
板带材，厚度1 mm								
M20	235	69	45	45	—	—	160	—
OS025	235	76	45	45	—	—	160	76
OS050	220	69	45	40	—	—	150	—
H00	250	195	30	60	10	25	170	—
H01	260	205	25	70	25	36	170	—
H02	240	250	14	84	40	50	180	90
H04	345	310	6	90	50	57	195	90
H08	380	345	4	94	60	63	200	95
H10	395	360	4	95	62	64	200	—
板带材，厚度6 mm								
M20	220	69	50	40	—	—	150	—
OS050	220	69	50	40	—	—	150	—
H00	250	195	40	60	10	—	170	—
H01	260	205	35	70	25	—	170	—
H04	345	310	12	90	50	—	195	—

续表 4.2-57

状态	抗拉强度/MPa	屈服强度①/MPa	标距 50 mm 时的伸长率/%	硬度			抗剪强度/MPa	疲劳强度②/MPa
				HRF	HRB	HR30T		
板带材，厚度 25 mm								
H04	310	275	20	85	45	—	180	—
棒材，直径 6 mm								
H80(40%)	380	345	10	94	80	—	200	—
棒材，直径 25 mm								
M20	220	69	55③	40	—	—	150	—
OS050	220	69	55③	40	—	—	150	—
H80(35%)	330	305	16④	87	47	—	185	115
棒材，直径 50 mm								
H80(16%)	310	275	20	85	45	—	180	—
线材，直径 2 mm								
OS050	240	—	35⑤	45	—	—	165	—
H04	380	—	1.5⑥	—	—	—	200	—
H08	455	—	1.5⑥	—	—	—	230	—
管材，外径 25 mm × 壁厚 1.65 mm								
OS025	235	76	45	45	—	—	160	—
OS050	220	69	45	40	—	—	150	—
H55(15%)	275	220	25	77	35	45	180	—
H80(40%)	380	345	8	95	60	63	200	—
型材，直径 13 mm								
M20	220	69	50	45	—	—	150	—
M30	220	69	50	45	—	—	150	—
OS050	220	69	50	45	—	—	150	—
H80(15%)	275	220	30	—	35	—	180	—

①载荷下延伸 0.5%。②$10^8$ 次。③面缩率 70%。④断面收缩率 55%。⑤标距 254 mm 的伸长率。⑥标距 1 500 mm 时的伸长率。

2）硬度　室温硬度 35 ~ 45HBS（M 态），85 ~ 95HBS（Y 态）。

退火温度对 TU1 硬度的影响见图 4.2-29，变形率对 TU1 硬度的影响见图 4.2-30。

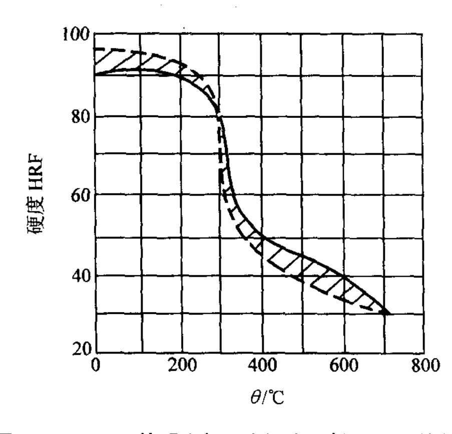
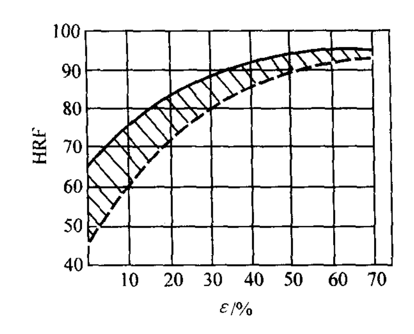


图 4.2-29　TU1 的硬度与退火温度（保温 1h）的关系



原材料：厚度 1 mm 的软板
晶粒大小：——0.015 mm；－－－－0.040 mm

图 4.2-30　TU1 硬度与变形率的关系

3）拉伸性能　室温下 TU2 板材的拉伸性能：σ_b = 350 ~ 390 MPa，δ = 3% ~ 10%（Y 态）；σ_b = 220 ~ 235 MPa，δ = 45% ~ 55%（M 态）。

无氧铜断面收缩率与温度的关系见表 4.2-58；抗应力－断裂性能见表 4.2-59；变形率、退火温度对 TU2 拉伸性能的影响，以及各种温度下无氧铜的拉伸性能见图 4.2-31 ~ 图 4.2-36。

表 4.2-58　无氧铜断面收缩率 ψ 与温度 θ 的关系

θ/℃	20	100	350	400	500	700	断面收缩率随温度上升的变化特点
ψ/%	67	75	26	34	25	32	有峰值地大量下降

表 4.2-59　C10100 和 C10200 的抗应力－断裂性能

状态	试验温度/℃	应力－断裂性能①		
		10 h/MPa	100 h/MPa	1 000 h/MPa
OS025②	150	—	161	147
	200	—	130	106
冷拔 40%③	120	—	272	(245)
	150	—	241	(215)
H80④	450	33	17	—
	650	9.7	5.2	—

① 括号内数字为外推值。
② 21℃时的抗拉强度为 238 MPa。
③ 21℃时的抗拉强度为 352 MPa。
④ 21℃时的抗拉强度为 426 MPa。

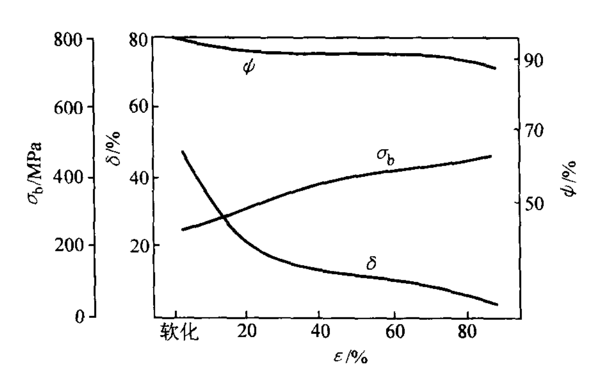


图 4.2-31　TU2 线材的拉伸性能与变形率的关系

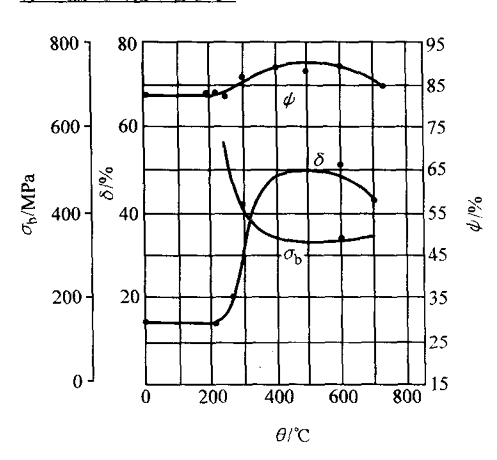
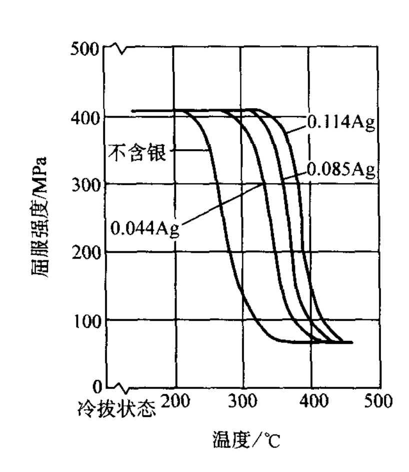


图 4.2-32 TU2 铜线（ε = 62.5%）拉伸性能与退火温度（保温 1 h）的关系



材料：直径 2 mm 的冷加率 90% 的线材
在所示温度下退火 30 min

图 4.2-33 无氧铜的软化特性与银含量的关系

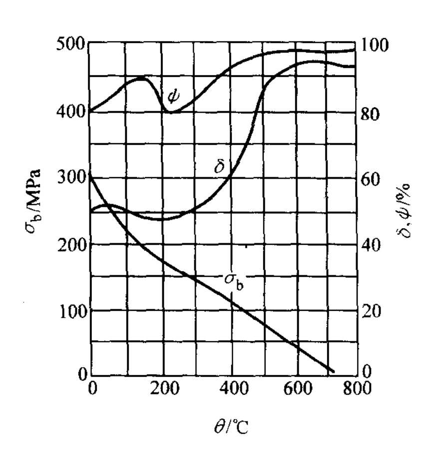


图 4.2-34 无氧铜高温拉伸性能

4）冲击性能　冲击韧度 a_{KU} = 1 560 ~ 1 760 kJ/m^2（M 态棒材）。

5）扭转和剪切性能　抗剪强度 τ = 210 MPa（Y 态）；τ = 150 MPa（M 态）。

6）持久和蠕变性能见表 4.2-60。

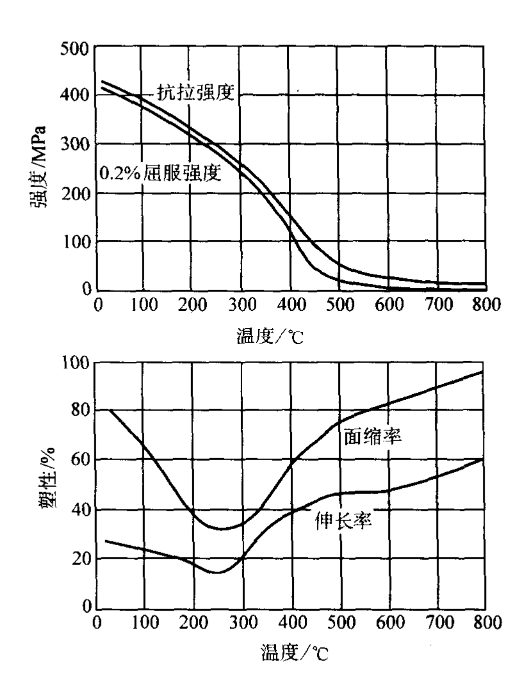


图 4.2-35 C10100 或 C10200（1180 状态）纯铜的高温拉伸性能

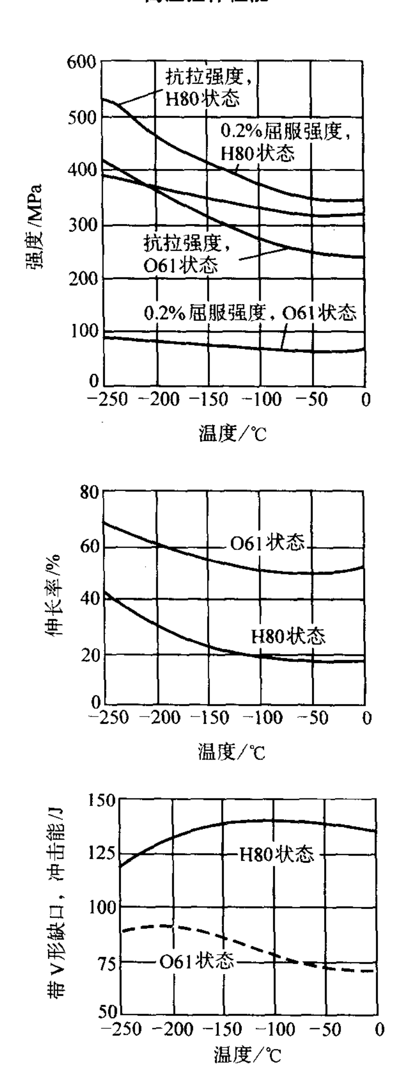


图 4.2-36 C10100 或 C10200 纯铜的低温力学性能

表 4.2-60　C10100 和 C10200 的蠕变性能

状态和晶粒度	试验温度/℃	蠕变速率为下列值时的应力①/MPa					
		$10^{-6}\ h^{-1}$	$10^{-5}\ h^{-1}$	$10^{-4}\ h^{-1}$	$10^{-3}\ h^{-1}$	$10^{-2}\ h^{-1}$	$10^{-1}\ h^{-1}$
OS025②	43	—	—	—	170	185	200
	120	—	—	—	125	150	165
	150	11	25	55	110	130	150
	205	3	10	33	—	—	—
	260	0.7	3	12			
	370	—	—	—	—	21	(40)
	480	—	—	—	—	9.9	(23)
冷拔 40%③	43	—	—	—	310	330	
	120	—	—	—	240	270	(295)
	150	—	—	—	200	235	250
	370	—	—	—	11	26	(39)
	480	—	—	—		8.3	(17)
	650	—	—	—	—	3	6
冷拔 84%④	150	—	55	89.6	—	—	—
	205	(4.5)	12	35	—	—	—

① 括弧中数字为外推值。
② 21℃时的抗拉强度为 220 MPa。
③ 21℃时的抗拉强度 352 MPa。
④ 21℃时的抗拉强度为 375 MPa。

7）疲劳性能　高周疲劳强度极限：TU2 板材，冷变形 50%，循环次数：10^8 周，$\sigma_D = 119$ MPa。

8）弹性性能　弹性模量 $E = 117.2$ GPa。切变模量 $G = 44.1$ GPa。

3.5　工艺性能

1）熔炼与铸造工艺　无氧铜主要使用工频有芯感应电炉熔炼。为保证无氧铜质量，要做到“精料密封”，即原料选用含 $w_{Cu} > 99.77\%$ 及 $w_{Zn} < 0.003\%$ 的电解铜，熔炼时必须注意减少气体的来源，并使用经煅烧处理的木炭覆盖，也可添加微量磷作脱氧剂。采用煤气或氮气保护或烟灰覆盖下的半连续铸造工艺浇注铸锭。铸造温度为 1 150 ~ 1 180℃。

2）成形性能　无氧铜的冷热加工性能均极好，可以拉伸、压延、挤压、弯曲、冲压、剪切、旋压、镦锻、旋锻、锻造、螺纹轧制、滚花、缠绕，可锻性极好为锻造黄铜的 65%。热加工温度在 800 ~ 900℃进行。

3）焊接性能　易于进行熔焊、软钎焊、硬钎焊、气体保护钨弧焊、气体保护金属弧焊，其氧燃料气焊的性能良好，不推荐保护金属弧焊和大多数电阻焊方法。

4）切削加工与磨削性能　无氧铜的切削加工性为易切削黄铜 HPb63-3 的 20%。

3.6　无氧铜的选材与应用实例

无氧铜中氧和杂质的含量极低，特别适合于有如下要求的应用领域：电导率高且延展性好，透气率低，不产生氢脆或放气倾向小。主要用于电真空器件，典型用途包括：母线，波导管，引入线，阳极，真空密封，晶体管元件，玻璃—金属密封，同轴电缆，速度调制电子管，微波管，应用时需注意避免在氧化气氛中加热。无氧铜常见的品种规格与供应状态见表 4.2-61。

表 4.2-61　无氧铜的品种规格与供应状态

牌号	品　种		d 或 δ/mm	供应状态
TU1，TU2	棒　材	拉制	5 ~ 80	Y，M
		挤制	16 ~ 120	R
	板　材		0.40 ~ 10.00	Y，M
	带　材		0.06 ~ 1.20	
	管　材		D：3 ~ 360；S：0.5 ~ 10	Y，M
			D：3 ~ 100；S：0.5 ~ 10	Y_2
			D：30 ~ 300；S：5 ~ 30	R
TU1	波导管		矩形、中等扁矩形、扁矩形、方形	Y
TU1，TU2	线　材		0.05 ~ 6.0	Y，M

4　弥散强化无氧铜

弥散强化无氧铜是一类具有优良综合物理性能和力学性能的新型功能结构材料，兼具高强高导性能和良好的抗高温软化能力，理想状态时可以满足电导率 > 90% IACS 的且强度超过 500 MPa。其中，弥散强化相粒子多为熔点高、高温稳定性好、硬度高的氧化物、硼化物、氮化物、碳化物。这些弥散相粒子以纳米级尺寸均匀弥散分布于铜基体内，在接近铜基体熔点的高温下也不会溶解或粗化，因此可以有效地阻碍位错运动和晶界滑移，提高合金的室温和高温强度，同时又不明显降低合金的导电性，并且具有较高的耐磨耐蚀性能。

弥散强化无氧铜的出现不仅丰富了铜合金的种类，而且扩大了其使用的温度范围，已被广泛应用于电阻焊电极、大规模集成电路引线框架、灯丝引线、电触头材料、大功率微波管结构材料、连铸机结晶器、直升机启动马达的整流子及浸入式燃料泵的整流子、核聚变系统中的等离子体部件、燃烧室衬套、先进飞行器的机翼或叶片前缘、电真空器件中前相波放大器、行波管、空调管、磁控管等。

目前，弥散强化无氧铜主要以 Al_2O_3 为强化相粒子，合金牌号根据 ASTM（美国）有 C15710，C15720，C15735，C15715，C15760，其中后两者为美国 SCM 生产，商用品名为 Glidcop。

4.1　化学成分（表 4.2-62）

表 4.2-62　Al_2O_3 弥散强化无氧铜化学成分　%

合金	元素	Cu	Al_2O_3	Fe	Pb	O
C15710	最小值	99.69	0.15	—	—	—
(99.8Cu-0.2Al_2O_3)	最大值	99.85	0.25	0.01	0.01	0.04
C15720	最小值	99.49	0.35	—	—	—
(99.6Cu-0.4Al_2O_3)	最大值	99.6	0.45	0.01	0.01	0.04
C15735	最小值	99.19	0.65	—	—	—
(99.3Cu-0.7Al_2O_3)	最大值	99.35	0.75	0.01	0.01	0.04
Glidcop Al-10	标准组成	99.8	0.2	—	—	—
Glidcop Al-35	标准组成	99.3	0.7	—	—	—
Glidcop Al-60	标准组成	98.8	1.2	—	—	—

表 4.2-63 Al_2O_3 弥散强化无氧铜物理性能

合金	热学性能				质量特性	电学性能	
	液相线温度 /℃	比热容（20℃）/J·（kg·K）$^{-1}$	热导率 /W·（m·K）$^{-1}$	线胀系数（20～300℃）/10^{-6} K^{-1}	密度 /g·cm^{-3}	电导率（20℃，体积测定法）/%IACS	电阻率（20℃）/μΩ·m
C15710	1 080	380	360	19.5	8.82	90	0.019 2①
C15720	1 080	380	353	19.6	8.81	89	0.019 4
C15735	1 080	420	339	20	8.80	85	0.020 3
C15715	1 083	—	365	16.6②	8.84	92	0.018 6
C15760	1 083	—	322	16.6②	8.81	78	0.022 1
Glidcop Al-10	1 082	—	361.2	19.5③	8.82	90	0.019 2
Glidcop Al-35	1 082	—	340.2	20.0③	8.80	85	0.020 3
Glidcop Al-60	1 082	—	323.4	20.4③	8.78	80	0.021 0

① 温度系数在20℃时为5.22 mΩ·m/K。
② 在20～1 000℃范围内的平均值，在此范围的狭小区段内的变化可忽略不计。
③ 温度范围约450℃。

4.2 物理及化学性能

1）物理性能见表4.2-63。
2）化学性能 弥散强化无氧铜耐腐蚀性能良好。

4.3 热加工和热处理规范

退火温度为650～875℃（C15710），650～925℃（C15720），650～925℃（C15735）。

4.4 力学性能

Al_2O_3 弥散强化无氧铜的典型力学性能见表4.2-64～表4.2-68，图4.2-37～图4.2-41。

Glidcop的弹性模量：108 GPa（Al-10），120 GPa（Al-35），140 GPa（Al-60）；20℃时，C15715，C15760的弹性模量为115GPa。

表 4.2-64 Al_2O_3 弥散强化无氧铜的典型力学性能

合 金	直径/mm	冷加工量或状态符号	抗拉强度① /MPa	屈服强度②（残余变形0.2%时）/MPa	伸长率（标距50 mm）/%	硬度 HRB	弹性模量 /GPa
C15710	棒材						
	24	0%	325	270	20	60	105
	22	13%	345	330	18	65	
	19	39%	415	400	16	70	
	16	56%	450	425	12	70	
	10	82%	510	470	10	72	
	6	93%	530	485	10	74	
		O61	325	275	20	60	
	线材						
	2	98.5%	56%	540	—	—	105
	1	99.5%	650	620	—	—	
		O61	325	275	—	—	
	0.8	99.8%	685	650	—	—	
		65%	455	420	—	—	
	0.5	99.9%	725	690	—	—	
		85%	475	450	—	—	
		O61	345	290	—	—	
C15720	板带材						
	0.75	91%	570	545	7	—	113
	0.51	95%	585	565	6	—	
	0.25	97%	605	580	5	—	
	0.152	98%	615	585	3.5	—	
		O61	485	380	13	—	
	棒材						
	24	0%	470	365	19	74	113
	21	26%	495	470	16	77	
	18	42%	510	485	14	78	
	16	56%	530	495	13	79	
	13	72%	540	505	11	79	
	10	82%	550	510	10	80	
	76	M30	525	610	13	78	
	102	M30	460	395	20	68	

续表 4.2-64

合　金	直径/mm	冷加工量或状态符号	抗拉强度/MPa	屈服强度（残余变形0.2%时）/MPa	伸长率（标距50 mm）/%	硬度HRB	弹性模量/GPa
C15735	24	0%	485	420	16	77	123
	19	39%	550	540	13	80	
	16	56%	585	565	10	83	
	64	M30	590	415	16	76	
	76	M30	565	540	11	78	
	102	M30	515	485	13	75	

表 4.2-65　Glidcop（$Cu-Al_2O_3$）的力学性能

合金	室温性能		退火性能							
	σ_b/MPa	δ/%	220℃		420℃		650℃		925℃	
			σ_b	δ	σ_b	δ	σ_b	δ	σ_b	δ
Al-10	500	10	500	11	440	24	415	26	395	27
Al-35	585	11	570	12	545	12	535	13	510	13
Al-60	620	3	620	3	600	4	600	4	550	5

注：Al-10 数据取自 90%冷加工度，Al-35、Al-60 数据均取自 55%冷加工。

表 4.2-66　各种工艺制备的弥散强化无氧铜的力学性能

制备方法	合金成分（体积分数）/%	冷加工量/%	状态（退火温度）	性能			
				σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率/%	电导率/%IACS
内氧化法	$Cu-0.7\%Al_2O_3$	0	挤压态	393	324	27	93
		0	650℃，1 h	393	324	28	
		0	980℃，1 h	386	317	29	
	$Cu-2.7\%Al_2O_3$	14	冷拉态	572	545	16	83
		14	650℃，1 h	524	486	22	
		14	980℃，1 h	496	455	22	
热化学法	$Cu-2.65\%Al_2O_3$	50	冷加工态	628	—	—	87
		50	1 000℃，1 h	560	—	—	87
	$Cu-2.7\%Al_2O_3$	0	挤压态	376	—	—	96
	$Cu-1\%ThO_2$	—	冷加工态	275	201	21	93.8
		—	600℃，1 h	270	193	25.8	—
	$Cu-2\%ThO_2$	—	冷加工态	417	393	7.5	92.6
		—	600℃，1 h	284	216	21.2	—
机械合金化法	$Cu-1\%CrB_2$	0	挤压态	507	476	—	—
	$Cu-1\%TiB_2$	0	挤压态	502	422	—	—
		0	900℃，1 h	456	394	—	—
	$Cu-1\%ZrB_2$	0	挤压态	526	470	—	—
	$Cu-1Al_2O_3$	0	挤压态	225	165	—	—
	$Cu-3\%Al_2O_3$	0	挤压态	210	125	—	—
	$Cu-5\%Al_2O_3$	0	挤压态	≈900	≈700	—	—
	$Cu-5\%TiB_2$	0	挤压态	≈1 000	≈800	—	—

续表 4.2-66

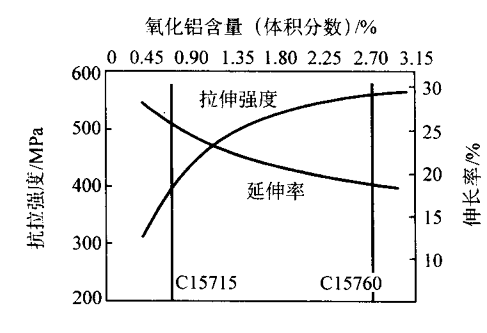
制备方法	合金成分（体积分数）/%	冷加工量/%	状态（退火温度/℃）	性能 σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率/%	电导率/%IACS
复合熔铸法	Cu-0.6%WC	0	铸态	148	—	50	98.9
	Cu-19.7%WC	0	铸态	304	—	3	—
	Cu-1.1%NbC	0	铸态	402	—	58.4	95.4
	Cu-32.9%NbC	0	铸态	402	—	5	—
	Cu-1.8%TiC	0	铸态	178	—	32.8	95.2
	Cu-31.2%TiC	0	铸态	357	—	8.9	47.6
	Cu-0.6TaC	0	铸态	153	—	44	103.4
	Cu-13.4%TaC	0	铸态	269	—	12.9	73.4
	Cu-1.6%VC	0	铸态	163	—	43.7	89
	Cu-15.3%VC	0	铸态	323	—	21.8	—
喷射沉积法	Cu-26.7%TiB_2	0	挤压态	—	150	—	—
反应喷射沉积法	Cu-26.7%TiB_2	0	挤压态	—	262	—	—
Mixalloy 法	Cu-3%TiB_2	50	冷加工态	455	434	16	83
	Cu-5%TiB_2	95	冷加工态	675	620	7.0	76

表 4.2-67　高温暴露 1 h 后，Glidcop Al-35 与 182 铜合金的室温硬度 HRB 对比

暴露温度/℃	36	110	220	320	430	540	650	760	870
Al-35	83	83	83	82.5	82	82	82	81	80
182 铜	86	86	81	72	58	40	22	7	

表 4.2-68　Glidcop　Al-35 和 Be-Cu（CA175）应力断裂性能对比

合金牌号	温度/℃	断裂应力/MPa 0.1 h	2 h	10 h
Al-35	430	290	280	203
	650	195	150	140
	870	100	77	55
Be-Cu（CA175）	430		215	168



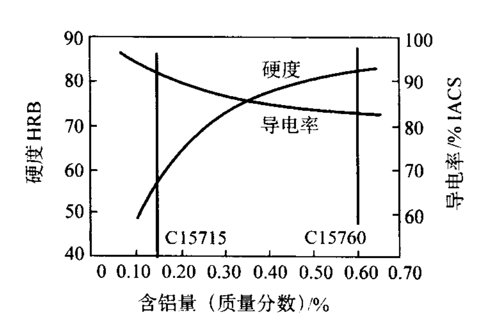


图 4.2-37　弥散强化铜合金的性能

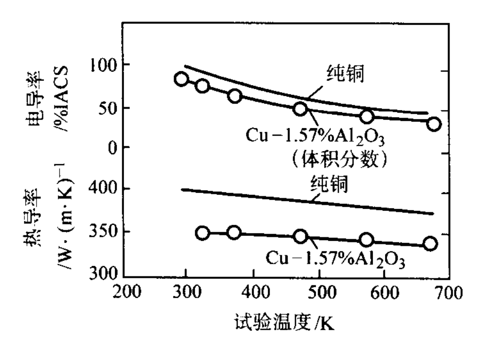


图 4.2-38　Cu-1.57%Al_2O_3（体积分数）合金和纯铜的热、电传导率

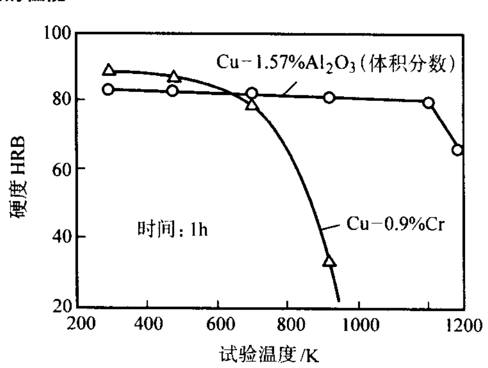


图 4.2-39　Cu-1.57%Al_2O_3（体积分数）合金与 Cu-0.9%Cr 沉淀硬化合金的高温硬度变化

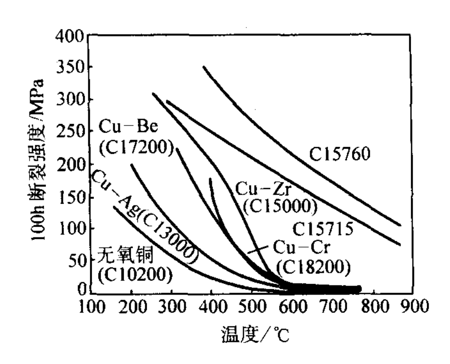


图 4.2-40　弥散强化铜合金的断裂性能

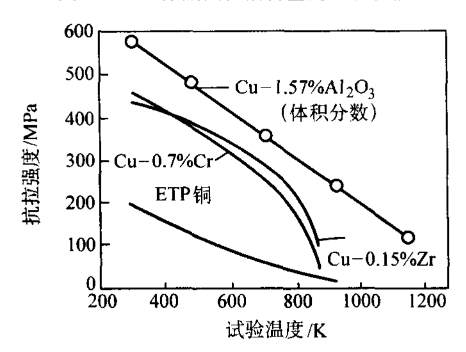


图 4.2-41　Cu-1.57Vol.% Al_2O_3 合金、Cu-0.15%Zr、Cu-0.7%Cr 合金和 ETP（电解韧性粗铜）的高温抗拉强度

4.5　工艺性能

1）成形性能　具有极好的冷加工性能，可以进行挤压、拉拔、锻造、轧制、弯曲及切削等加工，以满足各种不同的应用要求。热成形性差。

2）焊接性能　软钎焊：优；硬钎焊：良；电阻对焊：中；电阻点焊和缝焊：差。不推荐氧乙炔焊、气体保护弧焊和保护金属弧焊。

4.6　选材与应用实例

1）C15710 典型用途　轧制带材，轧制扁丝，电气接插件用棒材和线材，轻型载流弹簧，无机绝缘电线，热电偶线，引线，铝的电阻焊电极，散热器。

2）C15720 典型用途　轧制和控制带材，轧制扁线，拉制异型棒材，棒材，线材，继电器和开关弹簧用型材，引线框架，接触支座，散热器，电路断路器零件，转子用异型棒材，电阻焊条、操纵盘和滚轮，接插件，同时要求高强度和高导电性能、特别是经过高温加工后的零件。

3）C15735 典型用途　电阻焊条，断路器，引入导线，散热器，汽车零件；要求高温后仍保持高强度和高导电率的零件。

4）C15760 典型用途　电阻焊电极、断路器、接插件、馈线接点、等离子体喷嘴、高强度高温零件。

弥散强化铜合金在机电、电子、宇航和原子能等高科技领域的巨大应用潜力，正日益受到世界各国的重视。1973 年美国的 SCM 公司率先利用内氧化法将其工业化。其后弥散强化制合金的制备新方法不断涌现，合金体系不断扩大，工艺不断简化，合金性能也有所改善。其主要的制备方法有：内氧化法、机械合金化法、化学沉淀法、Exothermal Dispersion (XD™)、自蔓延高温合成法、复合铸造法、喷射沉积法、液相合金混合原位反应法。

5　电解铜箔

铜箔及铜合金箔是各种工业使用的重要材料，特别是在电子、电信、仪表、机械等部门用量很大。我国的铜箔需要量每年 7 000 ~ 9 000 t。铜箔生产方式主要有两种：一种是采用带坯进一步的高精度轧制，可以生产黄铜箔、青铜箔、铍青铜箔、白铜箔等品种；另一种是采用辊式方法连续电解，产品仅限于纯铜箔。

电解铜箔是覆铜箔层压板（CCL）及印刷电路板（PCB）制造的重要材料。在当今电子信息产业高速发展中，电解铜箔被称为电子产品信号与电力传输、沟通的“神经网络”。电解铜箔的生产已有数十年的历史，现在最宽箔可生产 1 ~ 2.5 m，厚度可到 0.005 mm，主要用于印刷电路板上，其中 0.035 mm 厚的铜箔用量占 95%，0.018 mm 以下的占 5%。电解铜箔的生产工艺主要由两部分组成，即制成满足宽度和厚度要求的卷状铜箔工序和表面处理工序。

电解铜箔可分为标准箔（STD - E）和高延箔（HD - E），其中标准箔要求单位面积质量为 44.6 ~ 1 831 g/m²，高延箔要求单位面积质量为 153 ~ 916 g/m²。

5.1　化学成分

未经表面处理铜箔的含铜量最低为 99.8%（包括含银量）。

5.2　物理性能

根据 GB/T 5230—1995，电解铜箔的单位面积质量及允许偏差应符合表 4.2-69 的规定，规格小于 153 g/m² 的铜箔可带有载体。表面未处理铜箔在 20℃时的电性能应符合表 4.2-70 规定。

表 4.2-69　电解铜箔的单位面积质量及允许偏差

规格 /g·m⁻²	单位面积质量允许偏差/%		名义厚度 /μm
	普通精度	较高精度	
44.6	± 10	—	5.0
80.3			9.0
107.0			12.0
153.0		± 5	18.0
230.0			25.0
305.0			35.0
610.0			69.0
916.0			103.0
1 221.0			137.0
1 526.0			172.0
1 831.0			206.0

表 4.2-70　电解铜箔表面未处理态 20℃的质量电阻率

单位面积质量 /g·m⁻²	质量电阻率/Ω·g·m⁻²
	≤
44.6	0.181
80.3	0.171
107.0	0.170
153.0	0.166
230.0	0.164
≥305.0	0.162

5.3 力学性能

根据GB/T 5230—1995，电解铜箔的室温拉伸性能如表4.2-71所示。

表4.2-71 电解铜箔室温拉伸性能

单位面积质量 /g·m^-2	抗拉强度 σ_b/MPa		伸长率 δ/%	
	标准箔	高延箔	标准箔	高延箔
	≥			
< 153	—	—	—	—
153	205	103	2	5
230	235	156	2.5	7.5
305	275	205	3	10
≥610	275	205	3	15

5.4 工艺性能

电解铜箔的焊接性应符合GB/T 4723、GB/T 4724、GB/T 4725的规定。从覆箔板基板上剥离下来的表面处理铜箔的抗剥强度、以及载体铜箔的载体与铜箔的分离强度由供需双方协商。铜箔表面粗糙度见表4.2-72。

表4.2-72 电解铜箔表面粗糙度

单位面积质量/g·m^-2	轮廓最大高度 R_y/μm
153、230、305	≤5
610	≤8
≥916	≤10

5.5 电解铜箔的主要工艺参数

溶铜温度：高温溶铜为85～90℃，低温溶铜为60～70℃。电解时槽电流：一般为4 000～8 000 A。国外较先进水平的槽电流为20 000～100 000 A。阴极辊：辊身长1～2.5 m，辊径为2～2.2 m。电解液的组成：$CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 250 g/mL，H_2SO_4 150 g/mL，添加剂适量。电解液温度：40～50℃。电解电流密度：大于30 A/cm²。表面粗化处理液：由120 g/mL的$CuSO_4 \cdot 5H_2O$、80 g/mL的H_2SO_4和10～30 g/mL的硝酸盐组成。工作条件是液温50℃、电流密度为20 A/cm²，时间是30～60 s。用改变电流密度和阴极辊筒速度的方法控制铜箔的厚度。

5.6 电解铜箔的生产工艺

1）辊式连续电解法 这是电解铜箔最常用的生产方法，其原理是安装在电解槽里的阴极辊筒，一部分浸在电解液中，通过低压直流电后，溶液中的铜离子被电解沉积到辊筒表面形成铜箔，阴极辊以一定的速度连续转动，辊筒上的铜箔不停地从阴极辊筒上剥离下来，再经水洗、烘干、剪切等工序，最后卷绕成铜箔卷。这种方法制铜箔，必须进行表面处理，才能满足印刷线路板用铜箔各种性能的要求。典型的辊式连续电解法生产铜箔原理示意图如图4.2-42所示。

2）环带式连续电解法 该法是在电解槽内，设置由导电材料制成的环形带，将此环形带的下侧运行部分浸在电解液里，环带连续地运行，环带为负极，相当于阴极辊筒。在电解槽内放置多组不溶性阳极板，与辊式法一样的原理，电解液中的铜离子沉积到环形带上，铜箔则从环形带上剥离下来，卷成箔卷。这种方法的优点是设备结构简单，阴极的有

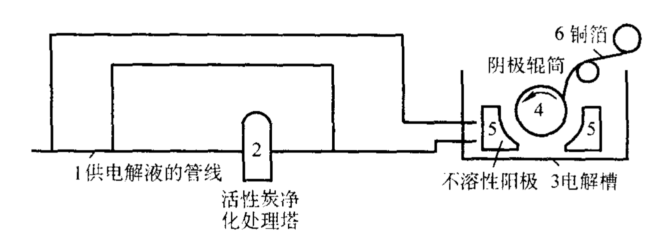


图4.2-42 典型的辊式连续电解法生产铜箔工艺流程

效电解面积大，宽度增加，提高了产量。环带式连续电解法电解原理示意图如图4.2-43所示。

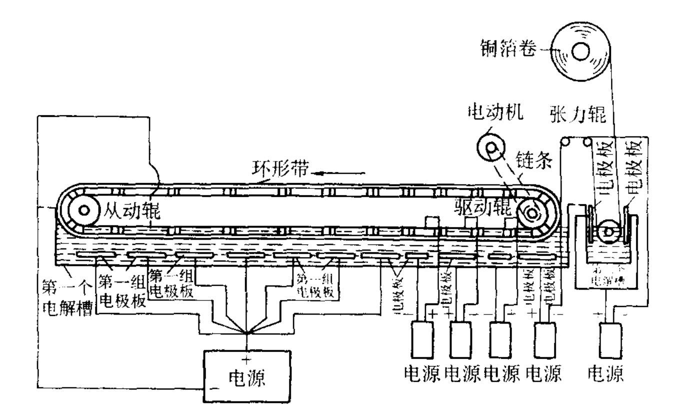


图4.2-43 环带式连续电解法电解原理示意图

3）用载体生产超薄铜箔的方法 这种方法是将铜镀在可溶性的铝载体上，经过进一步处理制成覆铜层压板支撑铜箔，再将载体与覆铜层压板分离制成铜箔。这种方法可制成18 μm的超薄铜箔，具体工艺是：用表面经过处理的铝支撑层，在支撑层上面镀一层厚度足以形成粗面的第一层铜箔，在该箔上涂一层薄防粘层，再镀第二层非自承重厚度的铜层。这里把支撑层、第一层铜层、防粘层统称为“载体层”是为超薄铜箔提供容易分离、干净、不会擦伤表面的载体。第二镀铜层可用现有的方法进行表面处理，增加表面黏结强度，以便层压到基底材料上。层压方法是将复合箔叠放到浸环氧树脂的绝缘基底上，超薄铜箔层与基底材料接触，在加热加压条件下压制成层压板，冷却后将载体层剥离下来，留下具有超薄铜箔的覆铜层压板。这种方法生产的铜箔适于印刷电路板用铜箔。

4）电解铜箔的表面处理 表面处理就是对铜箔的基本层表面进行粗化处理，化成皮膜和防锈处理，以提高箔材绝缘基材料的高温粘结强度。具体工艺包括将电解铜箔预先洗净，再活化洗净，表面粗化处理，化成皮膜处理，防锈处理，经干燥后制成铜箔。电解铜箔表面处理的方法大致可分为机械法、化学法和电化学法三种。

① 机械法 是对铜箔的粗糙表面进行机械的磨削加工，以提高铜箔表面粗糙度，改善其黏结强度，这种方法作用不明显，特别是对0.035 mm以下的铜箔。

② 化学法 该法是在不加任何外部电源的情况下，采用浸渍或喷射的方式对铜箔表面进行镀覆或腐蚀处理，使铜箔表面产生一定的化学反应，形成一定形貌的表面凹凸结构，以达到改善铜箔表面黏结性能的目的。表面处理还包括涂黏结剂和干燥工序，再按规定的尺寸剪切成箔片或卷制品提供产品。由于印刷电路的特点，要求对合成树脂层压板有优良的黏着力，对熔融软钎料有优良的耐热性，对涂上黏结层的电路板有足够长的寿命。美国MTI（Material Technology Inc）公司的铜箔表面处理流程如图4.2-44所示。

图 4.2-44　美国 MTI 公司表面处理流程

③ 电化学法　此是以电化学作用达到与上述相同目的的方法，它借助于外部电源，对铜箔表面实施一定的电化学沉积或电化学氧化处理，来提高和改善铜箔表面的黏结性能。根据铜箔所处电极的不同，电化学方法又分为阳极处理和阴极处理。此外，还有复合电沉积处理（采用悬浮有不导电的不溶性微粒子的处理液，在阴极的铜箔表面形成一层含不溶性微粒子的沉积层）、添加剂型处理（在电解液中加入物质改善沉积层的组织以控制铜箔表面状态）和工艺性处理方法（不施加任何添加剂，通过对溶液参数和电解参数等工艺参数的控制进行表面处理）。

图 4.2-45 为美国奥林公司电解铜箔和表面处理设备，其表面处理是一种电化学的工艺处理方法，在通常的辊式连续电解方法基础上经过改进，边电解铜箔边进行铜箔的表面处理。电解铜箔过程，将阴极辊分为电镀区和表面处理区，在电镀区内加基准电流，在另一区内叠加一个大于阴极电流密度的电流，使之在铜箔剥离前进行表面处理，大大减化了工艺流程。各种表面处理方法的比较如表 4.2-73 所示，引进的设备与我国原有设备的比较见表 4.2-74。

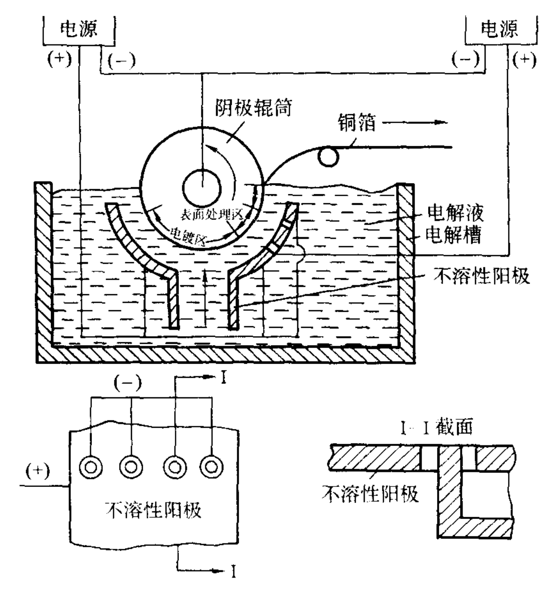


图 4.2-45　美国奥林公司电解铜箔和表面处理设备

表 4.2-73　各种表面处理方法的比较

分类	优点	缺点
化学处理	设备简单，厚度均匀，节省能源	黏结力提高不明显，反应速度慢、生产效率低，槽液组成复杂、难控制
阳极氧化处理	工艺稳定，控制范围大，操作简单	黏结力提高不显著，不能进行无胶层压
复合电沉积处理	能明显提高黏结力，工序简单	槽液极难控制和维护，对铜箔电性能有一定影响，蚀刻条件要求苛刻
添加剂型表面处理	能明显提高黏结力，工序简单，添加剂种类多，潜力大	槽液难控制，有毒添加剂较多，对环境有影响
一般工艺处理	槽液稳定，易于控制和维护，阴极电流效率较高	黏结力提高不显著，易产生铜粉转移
脉冲电流处理	能大大提高黏结力，工序简单，槽液稳定，沉积速度快	阴极电流效率较低，一次性投资较大

表 4.2-74　引进的电解箱生产设备与国内原有设备的比较

项目	国内原有的设备	引进的设备（美国 CB 公司）
生产铜箔厚度/μm	设计 20，实际 35	18 ~ 35，可小到 12
生产铜箔宽度/mm	1 000	1 500
阴极辊直径/mm	800 ~ 900	2 134
辊身长/mm	1 100	1 600
制造材料	合金钢	外层钛，中间层铜，内层不锈钢
槽电流/A	设计 1 840，改进后 4 000 ~ 8 000	27 000
电压/V	5 ~ 7	9
铜箔剥离强度/$N \cdot cm^{-1}$	16	约 20
控制水平	—	阴极辊有速度、张力控制系统

5.7 我国电解铜箔业的发展简介

电解铜箔起源于20世纪30年代，最初仅作为装饰、防水材料应用于建筑行业。50年代，随着电子工业的迅速发展，人们才发现电解铜箔是制作印刷线路导电体的最佳材料。目前，电解铜箔广泛用于印刷电路、挠性母线、电波屏蔽板、高频汇流线及热能搜集器等，是先进电子工业最重要的专用基础材料之一，其中世界电解铜箔产量的95%是用于生产印刷线路板。

从电解箔业的生产布局及市场发展变化的角度来看，可将其发展历程划分为三大阶段，即电解铜箔业起步的时期（1955年到20世纪70年代），日本铜箔企业全面垄断世界市场的时期（1974年到20世纪90年代初）和世界多极化争夺市场的时期（20世纪90年代至今）。电解铜箔的生产水平以美国最高，可制得厚度为5 μm，宽度1 000 ~ 25 000 mm的铜箔，单机生产能力达100 ~ 300 t/a，现有生产线140多条，Yates公司和Gould公司年产均在15 000 t以上。我国西北铜加工厂经过攻关，现可生产6 ~ 9 μm厚的电解铜箔，技术性能能达到IEC和IPC标准。铁岭有色金属加工厂引进了1套美国CB公司的电解铜箔及表面处理生产线，可生产厚13 ~ 35 μm，宽1 500 mm的铜箔。虽然我国电解铜箔业发展速度较快，但还不能满足电子工业的需要，与国际先进水平存在一定的差距。原因之一就是厂多产量小，产品市场竞争力差。此外，现有的铜箔厂家不能完全满足国内对计算机、彩电、挠性电路等行业急需的高温高延展性铜箔、耐热铜箔、双面处理铜箔、高延展性等中、高档电解铜箔的需求，而低档铜箔市场趋于饱和，这种产品结构不合理以及技术人才的缺乏都是制约我国电解铜箔业发展的问题。不过，2001 ~ 2002年随着印刷电路板业和PCB的基板材料覆铜板的生产在中国的高速增长（2002年，上述两者在中国的生产值均居世界第三位），我国的电解铜箔产业在生产规模、设备水平和产品档次上都有了突飞猛进的发展。例如，在实施我国发展高科技的“863”计划中的18 μm镀锌高档电解铜箔项目方面，山东招远金宝电子有限公司、联合铜箔（惠州）公司获得很大的开发成果和技术进步。广东佛岗铜箔有限公司在此期间铜箔生产量上有成倍的提高，到2002年底年产能力达到1.1万吨，成为中国内地最大的铜箔企业。2003年间，我国内地又有几家大型电解铜箔生产厂家陆续投产。总的说来，我国内地电解铜箔年生产能力在1995年为3 911 t，2001年达到3.1万吨，2004年达到6.5万吨以上，成为世界电解铜箔业重要的组成部分。

编写：汪明朴（中南大学）
曹玲飞（中南大学）
李　周（中南大学）
审稿：唐仁政（中南大学）

第 3 章　高强导电铜合金

1　铬青铜

铬青铜是含 0.4% ~ 1.1% Cr（质量分数）的高铜合金。Cu-Cr 二元系相图富铜角为共晶型（图 4.3-1），在共晶温度 1072℃下，铬在铜中的最大固溶度为 0.65%。随温度的降低，固溶度急剧下降（表 4.3-1），固溶后时效处理析出 Cr 粒子相。铬青铜可以通过淬火-时效或淬火-冷变形-时效处理获得强化。铬的加入，一方面明显提高合金的再结晶温度和热强性，时效态铬青铜的软化强度为 400℃，是冷加工铜的二倍；另一方面使铜的导电性略有下降，固溶处理的铬青铜电导率为 45% IACS，时效处理后上升到 80% IACS。这种合金可在铸造状态和变形状态下使用。

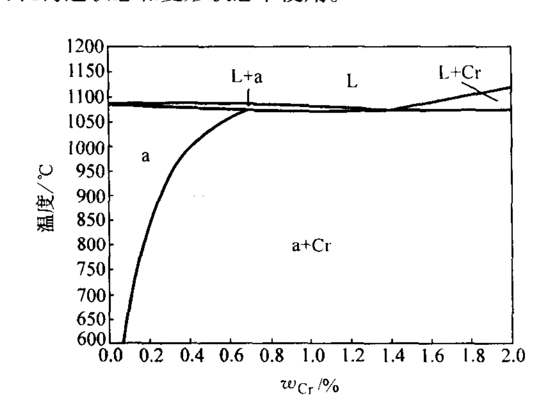


图 4.3-1　Cu-Cr 二元系相图

表 4.3-1　铬在铜中的固溶度与温度的关系

温度/℃	1 070	1 000	800	600	400
铬在铜中的固溶度/%	0.65	0.4	0.15	0.07	0.03

国产铬青铜的牌号有 QCr0.5，国外与之相近牌号见表 4.3-2，铬青铜的品种规格与供应状态见表 4.3-3。

表 4.3-2　铬青铜牌号

国别	中国	美国	俄罗斯	英国	德国	日本	ISO
牌号	QCr0.5	C18100 C18200 C18400	БрX1	CC101	CuCr	C1820	CuCr1

表 4.3-3　铬青铜品种、规格与供应状态

品种	板材	棒材	
厚度或直径/mm	0.5 ~ 15	5 ~ 40	18 ~ 160
状态	Y	Y，M	R

1.1　铬青铜的化学成分

按 GB/T 5233—2001 规定，QCr0.5 合金的化学成分列于表 4.3-4。

表 4.3-4　QCr0.5 合金的化学成分　　%

Cr	Cu	杂质 ≤		
		Fe	Ni	杂质总和
0.4 ~ 1.1	余量	0.1	0.05	0.5

C18200 的成分范围：0.6% ~ 1.2% Cr，Fe≤0.10%，Si≤0.10%，Pb≤0.05%，其他杂质总量不大于 0.5%，余量 Cu + Ag。

C18400 的成分范围：0.40% ~ 1.2% Cr，Zn≤0.7%，Fe≤0.15%，Si ≤ 0.10%，P ≤ 0.05%，Li ≤ 0.05%，As ≤ 0.005%，Ca≤0.005%，其他杂质总量不大于 0.5%，余量 Cu + Ag。

C18500 的成分范围：0.40% ~ 1.0% Cr，P≤ 0.04%，Li≤0.04%，Pb≤0.015%，余量 Cu + Ag。

1.2　铬青铜的物理及化学性能

1）热学性能　液相线温度：1 075 ~ 1 080℃。固相线温度：1 070 ~ 1 073℃。比热容：20℃时为 385 J/（kg·K）。热导率：TB00 状态，20℃时为 171 W/（m·K）；TH04 状态，20℃时为 324 W/（m·K）。QCr0.5 的低温热导率见表 4.3-5，高温热导率见表 4.3-6。

表 4.3-5　退火铬青铜 QCr 0.5 的低温热导率

温度/℃	−269	−263	−260	−251	−245	−242
热导率/W·（m·K）$^{-1}$	85.09	200.21	265.28	390.41	380.40	375.40

表 4.3-6　QCr 0.5 合金的高温热导率

θ/℃	100	600	900
λ/W·（m·K）$^{-1}$	167	301	255

线胀系数：QCr 0.5 合金 20 ~ 100℃的平均线胀系数 $\alpha = 17.64 \times 10^{-6}\ K^{-1}$，低温线胀系数见表 4.3-7。

2）质量特性　QCr 0.5 合金 20℃时的密度为 8.89 g/cm³。

3）电性能　电导率：TB00 状态（固溶态），20℃时为 40% IACS；TH04 状态（固溶-冷加工-时效态），20℃时为 80% IACS。电导率与退火温度的关系如图 4.3-2 所示。电阻率：TH04 状态（固溶-冷加工-时效态），20℃时为 0.021 6 μΩ·m。20 ~ 100℃电阻温度系数为 0.003 3 K^{-1}。

表 4.3-7　QCr 0.5 合金低温线胀系数

温度/℃	17	−3	−23	−43	−63	−83	−103	−123	−143	−163	−173
线胀系数 $\alpha/10^{-6}K^{-1}$	16.70	16.60	16.40	16.00	15.50	14.90	14.20	13.20	12.30	11.20	10.50

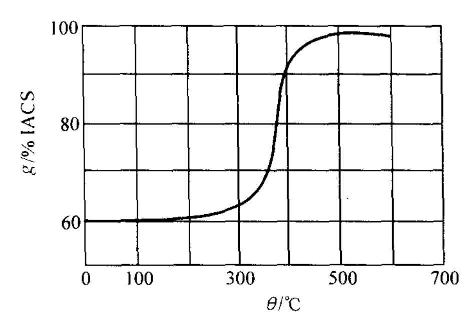


图 4.3-2 QCr 0.5 合金电导率与退火温度的关系

高温电导率和电阻率：含 0.7%Cr 的铬青铜经 1 000℃固溶淬火 + 84%冷变形 + 450℃时效 1 h 后，室温至 600℃的电导率和电阻率如图 4.3-3 所示。

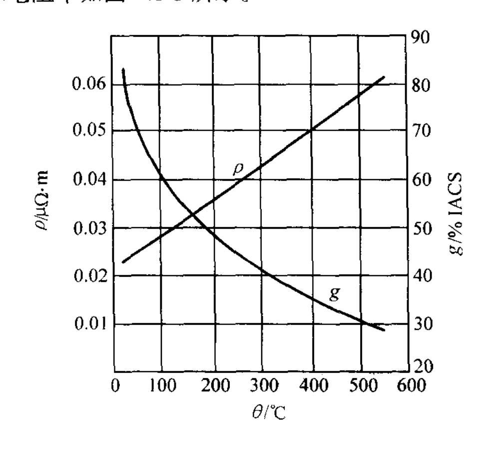


图 4.3-3 QCr 0.5 合金高温电阻率（ρ）和电导率（g）

4）化学性能　耐腐蚀性能：耐蚀性类似纯铜，抗电蚀性能优于纯铜。抗氧化性能：合金高温抗氧化性能良好，铬青铜的高温氧化性能见表 4.3-8。

表 4.3-8　铬青铜的高温氧化性能

合金	试样在不同温度下平均质量增加值/mg·(cm²·h)⁻¹			
	500℃	600℃	700℃	800℃
纯铜	0.58	1.40	2.47	4.50
QCr 0.5	0.50	0.7	2.04	4.0
QCr 0.5-0.2-0.1	0.23	0.57	0.80	1.21

1.3　铬青铜的热加工与热处理规范

热加工温度范围：800 ~ 925℃；固溶处理：980 ~ 1 000℃，10 ~ 30 min，水淬；时效处理：425 ~ 500℃，2 ~ 4 h，空冷。

1.4　铬青铜的力学性能

(1) 技术标准规定的性能

技术标准规定的性能见表 4.3-9。

表 4.3-9　铬青铜技术标准规定的性能

品种	状态	厚度或直径 /mm	σ/MPa ≥	δ_{10}/% ≥	HB	技术标准
板材	Y	0.5 ~ 15	—	—	≥110	GB/T 2045—1980
棒材	Y	5 ~ 40	390	5	—	
	M	5 ~ 40	230	38	—	GB/T 4423—1992

(2) 室温力学性能

1）硬度　室温下合金硬度见表 4.3-10。

表 4.3-10　不同状态下铬青铜的室温硬度

品种	厚度或直径 /mm	状态			HRB
		固溶/℃	冷变形/%	时效	
板材	0.9	980	50	—	66
			—	500℃，3 h	59
			50	450℃，3 h	79
棒材	12	1 000	50	—	70
			—	500℃，3 h	82

2）拉伸性能　固溶-时效态和固溶-冷变形-时效态铬青铜的室温拉伸性能见表 4.3-11。

表 4.3-11　不同状态铬青铜的室温拉伸性能

品种	厚度或直径 /mm	状态			σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ /%
		固溶温度/℃	冷变形/%	时效	MPa		
板材	0.9	980	—	—	235	130	40
			—	500℃，3 h	350	250	22
			50	—	365	350	6
			50	450℃，3 h	460	405	14
棒材	12	1 000	—	—	310	—	40
			—	500℃，3 h	480	380	21
			60	—	390	385	11
			60	450℃，3 h	530	450	16

C18200，C18400 和 C18500 的典型力学性能见表 4.3-12。

表 4.3-12　C18200，C18400 和 C18500 的典型力学性能

状　态	σ_b/MPa	σ_s/MPa	δ/%	HRB
板带材，厚度 1 mm				
TB00（固溶处理）	235	130	40	16
TF00（固溶-500℃时效 3 h）	350	250	22	59
TD04（固溶-冷加工到全硬）	365	350	6	66
TH04（TD04 之后 450℃时效 3 h）	460	405	14	79
板材，厚度 50 mm				
TF00（固溶-时效）	400	290	25	70
棒材，直径 4 mm				
TD08（固溶-冷加工到弹性）	510	505	5	—
TH08（固溶-冷加工-时效到弹性）	595	530	14	—
棒材，直径 13 mm				
TB00（固溶处理）	310	97	40	—
TF00（固溶-500℃时效 3 h）	485	380	21	70
TD04（固溶-冷加工到全硬）	395	385	11	65
TH04（TD04 之后 450℃时效 3 h）	530	450	16	82
TH03（固溶-冷加工到 6%-时效）	530	460	19	83
棒材，直径 50 mm				
TF00（固溶-时效）	485	450	18	75
棒材，直径 100 mm				
TF00（固溶-时效）	380	295	25	68
管材，直径 9.5 mm				
O60（软化退火）	275	105	50	59HRF
管材，直径 31.8 mm				
TD04（固溶-冷加工到全硬）	405	395	21	67
TH04（固溶-冷加工 28%之后时效）	475	435	26	84

3）压缩性能　压缩屈服强度 $\sigma_{pc0.2}$ 为 548 MPa（60%冷变形 + 450℃3 h 时效）。

4）扭转与剪切性能　扭转屈服强度 $\tau_{p0.3}$ 为 280 MPa（60%冷变形 + 450℃3 h 时效）。抗剪强度 295 MPa（60%冷变形 + 450℃3 h 时效）。

5）弹性性能　弹性模量为 117.2 GPa；切变模量为 49.6 GPa。

（3）低温和高温力学性能

1）硬度　不同状态铬青铜的高温硬度见表 4.3-13。

表 4.3-13　不同状态铬青铜的高温硬度

状态	温度/℃	20	300	400	500	600
含 0.6%Cr 棒材；980℃，水淬 + 50%冷变形 + 450℃，4 h 时效	HBS	129	69	48	23	12
含 0.79%Cr 棒材；1 000℃，水淬 + 50%冷变形 + 450℃，4 h 时效	HV	—	—	75	45	33

2）拉伸性能　QCr 0.5 板材的低温拉伸性能表 4.3-14。

表 4.3-14　QCr 0.5 板材的低温拉伸性能

拉伸性能	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%
-269℃	425	255	18.6

铬青铜高温拉伸性能见表 4.3-15、表 4.3-16 和表 4.3-17。

表 4.3-15　铬青铜（0.6% Cr）的高温拉伸性能

状态	试验温度/℃	σ_b/MPa	δ/%	ψ/%
含 0.6%Cr 棒材；980℃固溶 + 50%冷变形 + 450℃，4 h 时效	20	460	18	54
	300	355	13	39
	500	285	5	9
	600	225	6	10
	700	165	7	19

表 4.3-16　铬青铜（0.7%Cr）在 400℃时的力学物理性能

抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	弹性模量 E/GPa	断面收缩率 ψ/%	电阻率 /μΩ·cm	电导率 /%IACS	线胀系数 $\alpha/10^{-6}K^{-1}$		
						20～100℃	20～300℃	20～600℃
310	230	110	32.0	0.505	34.0	16.27	18.05	20.71

注：合金 1 000℃淬火后，84%冷变形，之后 400℃时效 1 h，试样经 400℃保温 1 h 再测定各种性能。

表 4.3-17　铬青铜（0.8%Cr）在 290℃时的力学性能

试验温度/℃	取　向	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
室温	纵　向	511	450	16.0	43.4
290	纵　向	352	186	4.2	7.2
290	横　向	331	289	2.7	5.8

3）持久性能和蠕变性能　铬青铜高温持久性能见表 4.3-18，高温蠕变性能见表 4.3-19。

表 4.3-18　铬青铜高温持久性能

状态	持久性能	200℃	300℃	400℃	500℃
1 000℃固溶 + 84%冷变形 + 450℃ 2 h 时效	σ_{100}/MPa	340	205	72	39
	σ_{1000}/MPa	315	—	28	—

表 4.3-19　铬青铜高温蠕变性能

状态	温度/℃	$\sigma_{1/1000}$	$\sigma_{1/10000}$	$\sigma_{1/100000}$
		MPa		
1 000℃固溶 + 43%冷变形 + 450℃，1 h 时效	300	185	145	110
	400	95	60	35
1 000℃固溶 + 84%冷变形 + 450℃，1 h 时效	300	200	150	115
	400	85	55	35

注：高温蠕变时间单位为小时。

4）疲劳性能　铬青铜疲劳性能见表 4.3-20。

表 4.3-20　铬青铜的高周疲劳性能

状态	σ_b/MPa	σ_b/MPa	N/周
84%冷加工	500	180	3×10^8
500℃，2 h 时效	503	195	3×10^8

1.5　铬青铜的工艺性能

1）熔炼与铸造工艺　合金通常采用中频感应电炉熔炼。熔池用 60%～70%的硼砂加 30%～40%玻璃组成的熔剂覆盖，也可采用煅烧木炭覆盖，采用磷铜脱氧。铬以 Cu-Cr 中间合金或金属铬的形式加入。在烟灰覆盖下进行半连续铸造，浇注温度 1 300～1 360℃。

2）成形性能　合金冷、热加工性能良好，可进行挤压、热轧、锻造（要求锻后进行固溶处理）等热加工，热加工温度为 820～930℃，热锻性为锻造黄铜 HPb60-2 的 80%。在固溶、退火或适当的拉拔状态下，可进行拉拔、冷轧、镦锻、型锻或弯曲等冷加工。

3）焊接性能　合金能锡焊、银焊和钎焊，易于进行气体保护电弧焊，对散热好的焊接部位采用电子束焊接效果好。熔焊和硬钎焊会降低热处理后材料获得的性能，这种焊接通常用于软状态，并随之施以必要的热处理。软钎焊性能良好，不推荐氧乙炔焊、保护金属弧焊、电阻点焊和电阻缝焊。

4）切削加工与磨削性能　合金的切削加工性为易切削黄铜 HPb63-3 的 20%。切削时使用含 20%铅油的矿物油作冷却润滑剂。

1.6　铬青铜的选材与应用实例

铬青铜有高的硬度和强度，导电导热性好，抗软化性能好，加工成形性能也好。广泛用于电气设备的高温导电耐磨零件。主要用途有：电动机整流子、集电环、高温开关、电焊机的电极、滚轮、夹持器、以双金属形式使用的刹车盘、圆盘及其他要求高热导率、电导率、高热强性的零部件。

2　锆青铜

锆青铜是含 0.15%～0.30%（质量分数）锆的高铜合金。Cu-Zr 二元系相图富铜角是共晶型（图 4.3-4），在共晶温度 965℃下，锆在铜中的最大固溶度为 0.15%，随温度的降低，锆在铜中的固溶度急剧减少（表 4.3-21）。时效过程中，从固溶体中析出微细的 β 相质点（Cu_5Zr 或 Cu_3Zr），产生沉

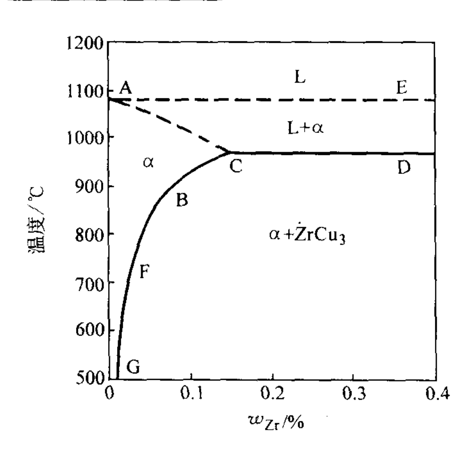


图 4.3-4 Cu-Zr 二元系相图

表 4.3-21 锆在铜中的固溶度随温度的变化

温度/℃	965	900	750	500
固溶度/%	0.15	0.08	0.03	0.01

淀硬化效果。锆的加入使铜的导电性略有下降，时效态合金的电导率为 90% IACS。锆大大提高了合金的再结晶温度和热强性，其耐热性优于铬青铜。

Cu-Zr 合金的力学性能与 Zr 含量的关系见图 4.3-5，锆含量对铜软化温度的影响见表 4.3-22。此外，砷可把 Cu-Zr 合金的共晶温度提高到 1 000 ~ 1 020℃，增加锆在此温度时的溶解度但降低它在低温下的溶解度。As 还可与 Zr 形成 Zr-As 化合物，细化锆青铜的晶粒，抑制合金在加热时的晶粒长大。应当注意，锑、锡、铅、硫、铁、铋、镍等都是锆青铜的有害杂质，不应超出标准规定的极限值。

国产锆青铜的牌号有 QZr0.2 和 QZr0.4。国外与之相近牌号是美国的 C15100、C15000 和俄罗斯的 BPH0.2。

2.1 锆青铜 QZr0.2 和锆青铜 QZr0.4

(1) 化学成分

按 GB/T 5233—2001 规定，QZr0.2 和 QZr0.4 锆青铜的化学成分见表 4.3-23。

(2) 物理及化学性能

1) 物理性能　加工锆青铜的物理性能见表 4.3-24 和图 4.3-6。

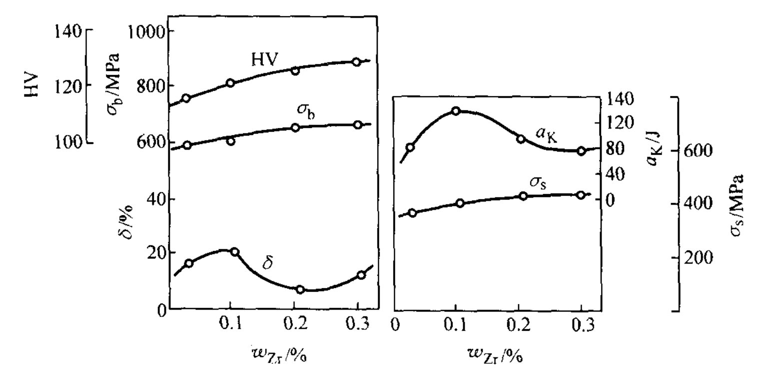


图 4.3-5 Cu-Zr 合金的力学性能与 Zr 含量的关系

表 4.3-22 锆含量对铜软化温度的影响

合金	Cu-0%Zr	Cu-0.10%Zr	Cu-0.13%Zr	Cu-0.15%Zr	Cu-0.19%Zr	Cu-0.23%Zr
软化温度℃	230	570	580	580	580	580

表 4.3-23 锆青铜的化学成分 %

合金	元素	Sn	Al	Zn	Mn	Fe	Pb	Sb①	Bi①	Si	Ni	S	Mg	Cr	Zr	As①	Cd	P	Cu	杂质总和
QZr0.2	最小值	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15	—	—	—	余量	—
	最大值	0.05	—	—	—	0.05	0.01	0.005	0.002	—	0.2	0.01	—	—	0.30	—	—	—		0.5
QZr0.4	最小值	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	—	—	—	余量	—
	最大值	0.05	—	—	—	0.05	0.01	0.005	0.005	—	0.2	0.01	—	—	0.50	—	—	—		0.5

① As、Bi 和 Sb 可不分析，但供方必须保证不大于最大值。

表 4.3-24 锆青铜的物理性能

合金	液相线温度/℃	固相线温度/℃	密度/g·cm⁻³	线胀系数/10⁻⁶K⁻¹			热导率/W·(m·K)⁻¹	电导率 ρ/%IACS
				20~100℃	20~300℃	20~600℃		
QZr0.2	1 081.5	—	8.93①	16.27②	18.01③	20.13③	339.13	93.3①
QZr0.4	1 066.4	966	8.85	16.32	18.80	19.80	334.94	84.5④

① Cu-0.2%Zr 合金，950℃淬火，冷加工 60%，450℃时效 2 h。
② Cu-0.15%Zr 合金，900℃淬火，冷加工 90%，400℃时效 1 h。
③ Cu-0.15%Zr 合金，900℃淬火，冷加工 84%，400℃时效 1 h；在 400℃保温 1h 后测定的线胀系数。
④ Cu-0.4%Zr 合金，900℃加热 30 min，淬火，冷加工 90%，400℃时效 1 h。

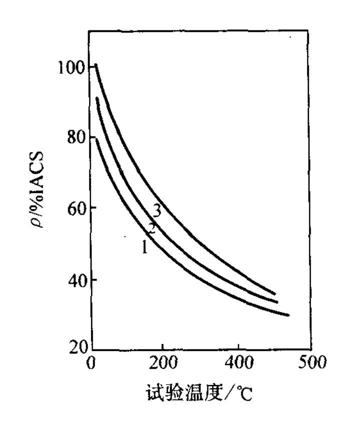


图 4.3-6　锆青铜的电导率与温度的关系

1—0.8%Zr；2—0.4%Zr；3—无氧铜

2）化学性能　耐腐蚀性能：类似纯铜，在大气、淡水和海水中耐蚀性良好，抗电蚀性能优于纯铜。

高温抗氧化性能：锆青铜有相当强的高温抗氧化性能，其热稳定性高于铬青铜 QCr0.5，大体与铬青铜 QCr0.5-0.2-0.1 相当。图 4.3-7 表示厚 0.5 mm 的 QZr0.2 合金在固定加热速度（200℃/h）加热时的氧化增量。

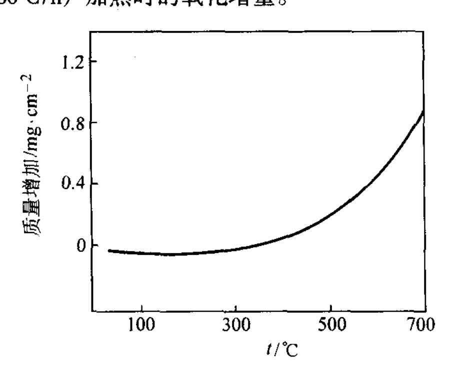


图 4.3-7　QZr0.2 的高温氧化性能

3）热加工与热处理规范　退火温度：450～550℃。热加工温度：750～875℃，锻造热加工时，如果温度降至 800℃以下即应中断锻造，在恢复锻造之前锻件至少再加热至 900℃。固溶处理：900～950℃，15～30 min，水淬。时效处理：400～450℃，2～3 h，空冷。

4）力学性能

① QZr0.2 合金　技术标准规定的室温力学性能见表 4.3-25。不同热处理状态 QZr0.2 的室温硬度见图 4.3-8 和图 4.3-9 所示，高温硬度见表 4.3-26。

表 4.3-25　技术标准规定的性能

品种	状态	d 或 δ/mm	σ_b/MPa ≥	δ_{10}/% ≥	HBS	技术标准
棒材	Y	5～80	294	5	130①	LTJ502—1997②
	M	5～80	196	30	—	
板、带材	M	0.3～12.0	205	30	—	Q/LT012—1992②
	Y	0.3～12.0	315	3	—	

① 硬化时效后的值。

② 洛阳铜加工厂企标。

冷加工对锆青铜 QZr0.2 抗拉强度的影响见图 4.3-10，时效温度对合金抗拉性能的影响见图 4.3-11。不同状态锆青铜 QZr 0.2 的力学和物理性能见表 4.3-27。

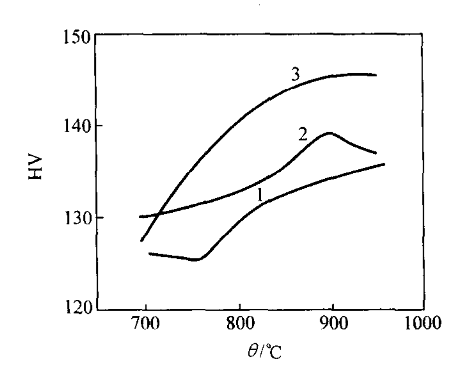


图 4.3-8　固溶处理温度对 QZr0.2 硬度的影响

1—淬火后冷轧 75%；2—250℃时效 1.5 h；3—400℃时效 1.5 h

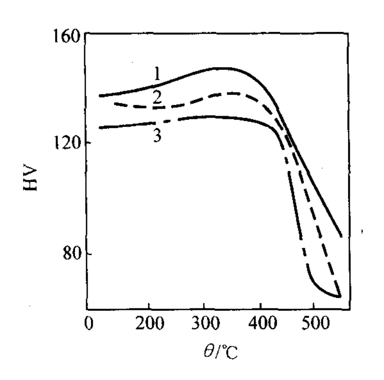


图 4.3-9　时效温度对 QZr0.2 合金硬度的影响

1—900℃淬火；2—800℃淬火；700℃淬火

表 4.3-26　锆青铜棒材的高温硬度

状态	试验温度/℃	400	500	600
945℃淬火＋50%冷变形＋450℃,4 h 时效	HV	77	55	32

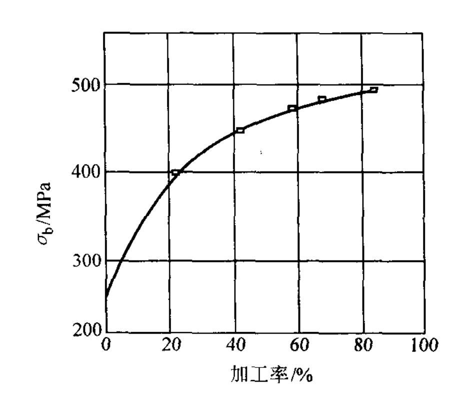


图 4.3-10　冷加工对 Cu-0.15Cr 合金抗拉强度的影响

（980℃15 min，固溶-冷变形-400℃时效 1 h）

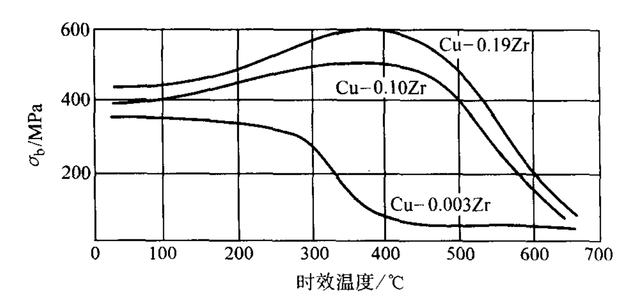


图 4.3-11　锆青铜 QCr0.2 的抗拉强度与时效温度的关系

表 4.3-27 QZr0.2 合金力学和物理性能

材料状态	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	HV	E /GPa	ρ /%IACS
980℃淬火，500℃时效 1 h	260	134	19.0	83	—	90
900℃淬火，500℃时效 1 h	230	160	40.0	—	—	83
900℃加热 30 min 淬火，冷变形 90%	450	385	3.0	137	136①	70
900℃加热 1 h，冷变形 90%，400℃时效 1 h	470	430	10.0	140		90
980℃淬火，冷变形 90%，400℃时效 1 h	492	428	10.0	150	133	83

① 950℃固溶处理后，冷变形 54%，425℃时效 1 h。

不同处理状态的 QZr0.2 线材力学性能及电导率见表 4.3-28。

表 4.3-28 不同状态锆青铜 QZr0.2 线材力学性能及电导率

试样①	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	ρ/%IACS
1	260	107	37.0	97.0
2	260	93	37.0	94.0
3	240	86	40.0	78.0
4	247	93	40.0	76.0
退火后冷拉 65%，达到 ϕ2.03 mm				
1	421	408	5.5	95.0
2	435	421	6.0	90.0
3	429	408	5.5	81.0
4	435	421	5.5	78.5
退火后冷拉 65%，再在 400℃时效 1 h				
1	415	373	10.0	96.0
2	421	373	12.0	95.0
3	421	380	10.0	92.0
4	450	408	13.0	93.0

① 试样：1—直径 3.35 mm 线材，在 750℃加热 30 min 后水冷；2—直径 3.35 mm 线材，在 800℃加热 30 min 后水冷；3—直径3.35 mm 线材，在 900℃加热 min 后水冷；4—直径 3.35 mm 线材，在 900℃加热 3 min 后水冷。

固溶处理温度对 QZr0.2 高温拉伸性能的影响见表 4.3-29，QZr0.2 棒材高温拉伸性能见表 4.3-30。

表 4.3-29 固溶处理温度对 QZr0.2 高温拉伸性能的影响
(合金固溶处理后，冷加工，400℃时效 1 h)

固溶处理温度/℃	试验温度/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{0.1}$/MPa	δ_5/%
800①	350	291	281	18.0
	450	231	203	22.0
	500	175	139	28.0
875①	350	313	293	20.0
	450	258	226	28.0
	500	219	190	25.0
950①	350	319	289	21.0
	450	271	242	21.0
	500	219	188	25.0
900②	350	394	324	16.0
	450	373	310	18.0
	500	324	—	17.0

① 冷变形 54%。
② 冷变形 84%。

表 4.3-30 QZr0.2 棒材高温拉伸性能

状态	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
960℃淬火 + 72%冷加工 + 460℃3 h 时效	20	480	440	32	68
	200	415	387	29	64
	300	383	371	27	60
	400	351	326	11	62

锆青铜的高温持久性能见表 4.3-31，高温蠕变性能见表 4.3-32，高温弹性性能见表 4.3-33。

表 4.3-31 QZr0.2 锆青铜高温持久性能

状态	θ/℃	σ_{1000} /MPa	σ_{2000} /MPa	σ_{5000} /MPa	σ_{10000} /MPa
960℃水淬 + 72%冷加工 + 460℃3 h 时效	200	340	337	333	(323)
	300	319	312	306	(294)
	400	250	235	(210)	(181)

注：括弧内数字是依据实验曲线的外推值。

表 4.3-32 QZr0.2 锆青铜高温蠕变性能

状态	θ/℃	$\sigma_{0.2/1000}$ /MPa	$\sigma_{0.2/2000}$ /MPa	$\sigma_{0.2/5000}$ /MPa	$\sigma_{0.2/10000}$ /MPa
960℃水淬 + 72%冷加工 + 460℃，3 h 时效	200	319	315	310	(299)
	300	289	282	275	(264)
	400	186	176	(156)	(137)

注：1. 高温蠕变时间单位为 h。
2. 括号内数字是依据实验曲线的外推值。

表 4.3-33 QZr0.2 锆青铜的弹性性能

实验温度/℃	20	296	490	600
E/GPa	133	112	107	102

② QZr0.4 合金　不同热处理状态 QZr0.4 合金的硬度和抗拉强度分别见图 4.3-12 和图 4.3-13。

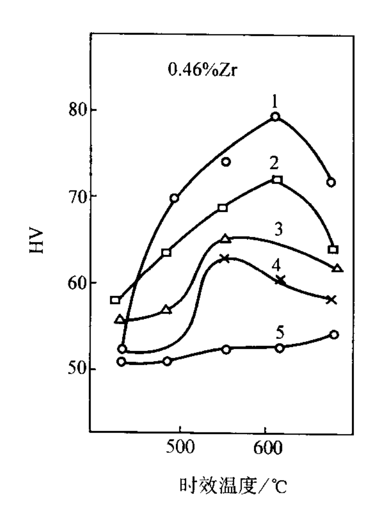


图 4.3-12 QZr0.4 合金硬度与固溶温度及时效温度（保温 1 h）的关系
固溶处理温度：1—1 000℃；2—950℃；3—925℃；4—900℃；5—825℃

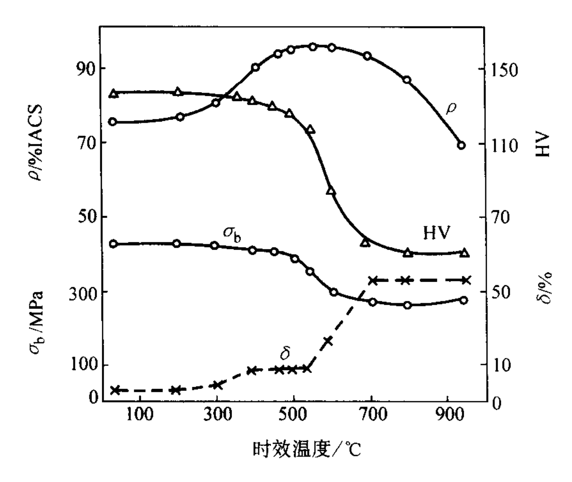


图 4.3-13 冷加工率 60%的 QZr0.4 合金 950℃淬火后性能与时效温度（保温 1 h）的关系

2.2 锆青铜 C15000

C15000 的典型力学性能见表 4.3-34，低温力学性能见表 4.3-35。

表 4.3-34 C15000 的典型力学性能

断面尺寸/mm	冷加工率/%		σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$[3] /MPa	δ_5 /%
	固溶处理[1]	时效[2]			
棒材					
5	—	76	430	385	8
6	10[4]	—	285	250	34
9.5	80	44	470	440	11
13	56	47	460	435	15
16	61	31	440	430	15
19	50	34	435	420	15
22	48	52	430	415	15
25	48	47	430	415	15
32	32	17	413	400	18
线材					
1	—	98[5]	525	495	1.5
2.3	—	62[5]	495	470	3
	0	—	200	40	54
	—	0	205	90	49
6	0[4][6]	—	255	75	50
13	30[4]	—	365	340	23

①900 ~ 925℃。②400 ~ 425℃时效 1 h 或更长。③载荷下延伸 0.5%。④轧制退火。⑤固溶处理，冷加工至所示量。⑥OS025 状态（退火态，平均晶粒度 0.025 mm）。

表 4.3-35 C15000 的典型低温力学性能

试验温度/℃	抗拉强度/MPa	缺口抗拉强度/MPa	屈服强度[1]/MPa	延伸率[2]/%	断面收缩率/%	冲击韧度[3]/J·cm^{-2}
22	445	673	411	16	62	121
-78	463	711	423	20	66	142
-197	534	775	453	26	71	155
-253	587	820	458	37	72	155
-269	591	838	446	36	69	—

注：TH04 状态，材料在 950℃固溶处理，冷加工 85% ~ 90%，在 450℃时效 1 h。
① 残余变形 0.2%。
② 两种直径。
③ V 形缺口，（摆锤式冲击试验），10 mm^2 标准试样。

C15000 在 950℃固溶处理 1 h，淬火，冷变形 85%，在 425℃时效 1h 的短时高温拉伸性能见图 4.3-14。

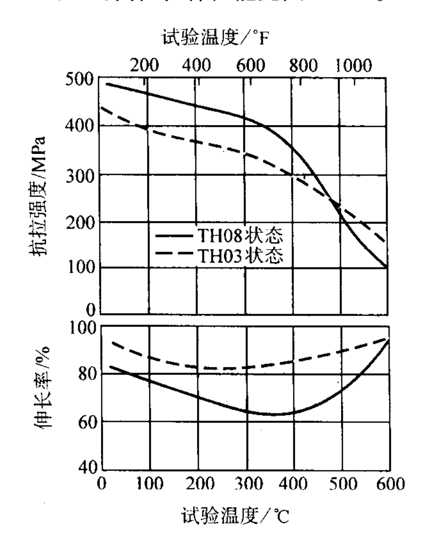


图 4.3-14 C15000 的短时高温拉伸性能
材料在 900℃固溶处理 15 min，淬火，冷加工和时效，TH03 状态的材料冷加工 54%后在 400℃时效 1 h；TH08 状态的材料冷加工 84%后在 375℃时效 1 h

C15000 的蠕变强度见表 4.3-36。

表 4.3-36 C15000 的蠕变强度

试验温度/℃	蠕变 1%时的应力/MPa		
	1 000 h	10 000 h	100 000 h
TH01 状态（固溶-冷加工到 1/4 硬再时效，冷加工 17%）			
300	277	241	208
350	217	166	185
400	150	123	102
450	98	70	51
500	88	39	16
600	28	15	7.5
TH02 状态（固溶-冷加工到 1/2 硬再时效，冷加工 43%）			
250	343	330	317
300	325	297	272
350	247	212	181
400	176	142	114
450	100	74	51
500	74	53	39
600	18	12	8.3
TH02 状态（固溶-冷加工到 1/2 硬再时效，冷加工 84%）			
250	321	312	303
300	305	271	240
350	257	238	219
400	201	161	139
450	77	53	44
500	63	41	28
600	5.2	2.8	1.5
650	3.0	1.7	1.0

注：材料经固溶处理，冷加工至所示量，之后在 425℃时效 1 h。

2.3　锆青铜 C15100

（1）化学成分

锆青铜 C15100 化学成分：0.05～0.15Zr，Al≤0.005，Mn≤0.005，Fe≤0.005，（Al＋Mn＋Fe）≤0.01，余量Cu。

（2）物理及化学性能

1）热性能　液相线温度：1 080℃。固相线温度：980℃。线胀系数：20～100℃时为 $16.9\times10^{-6}\ K^{-1}$；20～300℃时为 $17.6\times10^{-6}\ K^{-1}$；20～650℃时为 $20.2\times10^{-6}\ K^{-1}$。比热容：20℃时为385 J/（kg·K）。热导率：固溶处理，冷加工84%并经时效的材料，20℃时为367 W/（m·K）。

2）电性能　电导率：20℃时为93%IACS。电阻率：固溶处理，冷加工84%并经时效的材料，20℃时为0.018 6 μΩ·cm。

3）密度　20℃时密度为8.89 g/cm^3。

（3）热加工与热处理规范

热加工温度：900～950℃。退火温度：600～700℃。固溶温度：900～925℃。时效温度：固溶-时效，500～550℃；固溶-冷加工-时效，375～475℃；时效温度和时间取决于截面尺寸和预先的冷加工量。

（4）力学性能

硬度：直径16 mm棒材，TH04状态（固溶-冷加工-时效），72HRB；直径6 mm线材，OS025状态（退火，平均晶粒度0.025 mm），40HRB；直径13 mm线材，H01状态（冷加工到1/4硬状态），90HRF。

拉伸性能和疲劳强度：不同处理态C15100带材的拉伸性能和疲劳强度见表4.3-37。

表4.3-37　不同处理态C15100带材的拉伸性能和疲劳强度

状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度HRB	疲劳强度①/MPa
H01（冷轧到1/4硬）	295	240	22	32	—
H02（冷轧到1/2硬）	325	295	10	38	—
H03（冷轧到3/4硬）	360	345	5	48	—
H04（冷轧到硬）	400	385	3	57	95
H06（冷轧到超硬）	430	415	2	60	—
H08（冷轧到弹性）	470	455	2	62	—

① 循环次数 10^8。

弹性模量：拉伸弹性模量为129 GPa。

疲劳强度：TH04状态（固溶-冷变形-时效）：循环次数 10^8 时为180 MPa。

（5）工艺性能

可机加工性：为C36000（易切削黄铜）的20%。

可成形性：冷加工和热成形优良；最常采用的加工方法为模锻、弯曲、镦粗或锻造。

可焊性：软钎焊特性优；硬钎焊或电阻焊对焊特性良；不推荐其他焊接方法。

2.4　锆青铜的工艺性能

1）熔炼铸造工艺　元素锆易氧化，熔体吸气性能较强，合金宜采用真空熔炼。将原料铜同底炭（石墨块）一起装炉，以利对铜熔体脱氧，熔体需静止精炼，浇注前加锆，采用真空浇注铸锭，铸造温度为1 150～1 250℃。

2）成形性能　合金具有良好的冷、热加工性能，可进行锻造、挤压、拉伸、弯曲和旋压成形。热加工温度为800～950℃。

3）焊接性能　合金可钎焊、闪光焊，不宜气焊、电弧焊及以对缝电阻焊。

4）零件热处理工艺　固溶处理宜在保护气氛（氮气或木炭）或真空下进行，以防高温氧化。时效处理可使用中性盐浴炉或空气循环炉。

5）表面处理工艺　表面酸洗采用硫酸加重铬酸钠水溶液，在50～80℃下进行。

6）切削加工与磨削性能　能满意地进行切削加工。锻造或挤压后的切削加工性为易切削黄铜HPb63-3的20%，时效后30%。

2.5　锆青铜的应用

锆青铜生产工艺成熟，质量稳定，是良好的高温导电材料。典型用途有大功率集成电路用引线框架接插件以用于要求电导率高、强度适中、弯曲成形性和抗应力松弛性能好的场合，输电装置和整流器、高温用开关和断路器的底座，整流器，电阻焊头与滚轮，电动机集电环、散热零件及在高温下工作的其他零件。

3　铬锆青铜

在铬青铜中添加少量的锆，Cu与Zr形成化合物 Cu_3Zr，高温下 Cu_3Zr 为密集六方晶格，低温时为面心立方晶格，在铜中的溶解度随着温度的降低而明显减少。Cu-Cr-Zr合金由于Cr、Zr含量的不同，可从固溶体中单独析出 Cu_2Zr 或同时析出 Cu_3Zr 相和 Cr_2Zr，起析出强化作用，锆的加入使铬青铜合金的强度、硬度、耐热性提高，对合金电导率的影响不大。

Al与Mg可作为铬锆青铜的合金元素，它们可在Cu-Cr-Zr合金表面形成一层薄的、致密的与基体金属结合牢靠的氧化物膜，提高合金的高温抗氧化性能与耐热性，Al与Mg在合金中含量通常不大于0.3%。

国产铬锆铜牌号为QCr0.5-0.2-0.1，美国牌号为C18100。

3.1　化学成分

铬锆青铜的化学成分见表4.3-38。

表4.3-38　QCr0.5-0.2-0.1和QCr0.6-0.4-0.005的化学成分　%

牌号	Cr	Zr	Mg	Cu
QCr0.5-0.2-0.1	0.4～1.2	0.05～0.3	0.03～0.06	余量
QCr0.6-0.4-0.005	0.6	0.4	0.005	余量

C18100的化学成分为：99Cu-0.8 Cr-0.16 Zr-0.04Mg（质量分数）。

3.2　铬锆青铜的物理性能和化学性能

1）热性能　液相线温度：1 075℃。热导率：20℃时为324 W/（m·K）。线胀系数：20～100℃时为 $16.7\times10^{-6}\ K^{-1}$；20～200℃时为 $18.2\times10^{-6}\ K^{-1}$；20～300℃时为 $19.3\times10^{-6}\ K^{-1}$。

2）密度　20℃时为8.88 g/cm^3。

3）弹性模量　125 GPa。

4）电性能　电导率：在退火状态下，20℃时为80%IACS。电阻率：在退火状态下，20℃时，为0.021 7 μΩ·m。

5）化学性能　铬青铜和铬锆青铜的氧化性能与温度的关系见图4.3-15。

3.3　热加工与热处理规范

热加工温度：790～925℃。退火温度：600～700℃。固溶处理：900～975℃，1 h。时效处理：400～500℃，1 h。

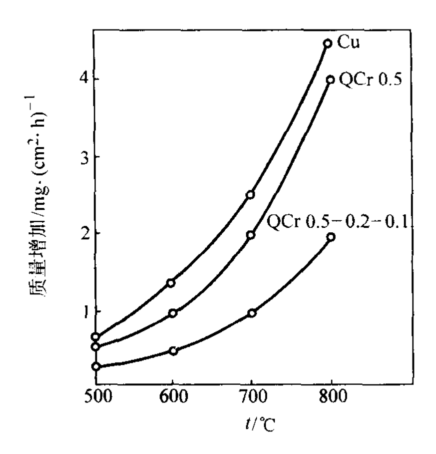


图 4.3-15 温度对铬青铜的氧化性能影响

3.4 力学性能

C18100 的力学性能见表 4.3-39 和表 4.3-40。

表 4.3-39 C18100 带材和线材的力学性能

状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	HRB
带材				
40%冷变形	460	430	6	—
40%冷变形－时效	495	455	10	—
线材				
60%冷变形	480	435	6	—
60%冷变形－时效	515	470	11	80
75%冷变形	495	455	5	—
75%冷变形－时效	550	475	12	—
90%冷变形	500	455	4	—
90%冷变形－时效	585	515	12	—

表 4.3-40 QCr0.5-0.2-0.1 和 QCr0.5 在 400～600℃ 时力学性能的比较

合金	不同温度下的持久硬度 HB			500℃时的持久强度	
	400℃	500℃	600℃	应力/MPa	断裂时间/h
QCr0.5	54	42	25	70	105
QCr0.5-0.2-0.1	58	50	27	90	160

3.5 工艺性能

1）可成形性　冷热成形性优良。

2）可焊性　软钎焊性优，硬钎焊和气体保护弧焊良，电阻对焊中，不推荐氧乙炔点焊和电阻缝焊。

3.6 铬锆青铜的选材与应用实例

铬锆青铜主要用于电阻焊电极和轮盘，开关，断路器，高温线材，大功率集成电路用引线框架，半导体基极，散热器，连续铸锭模。

4 铁青铜

Cu-Fe 二元系相图见图 4.3-16。富铜角为包晶型，1 094℃包晶温度下，铁在铜中的溶解度均为 4%，600℃时下降到 0.15%（表 4.3-41）。Fe 有细化晶粒作用，抑制铜的再结晶过程和提高铜的强度，但降低铜的塑性。铁显著降低铜的电导率与热导率，时效后合金电导率约为 70%IACS。Fe 以独立形式存在于铜中，使铜呈铁磁性，磁化率为 1.1×10^{-6}。铁青铜除主要合金元素 Fe 外，还添加少量有 P，Co，Sn，Zn，Mg。

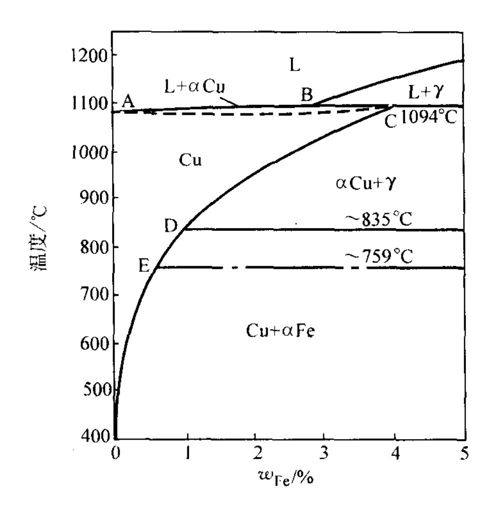


图 4.3-16 Cu-Fe 二元系相图

表 4.3-41 铁在铜中的固溶度与温度的关系

温度/℃	1 094	835	759	600
铁在铜中的溶解度/%	4	1	0.6	0.15

国产铁青铜牌号有 QFe1.0、QFe2.5、国外铁青铜牌号有 C19200、C19210、C19400、C19500，C19520 和 C19700。

4.1 铁青铜 QFe1.0（C19200）

（1）QFe1.0 的化学成分

QFe1.0 的化学成分见表 4.3-42。

表 4.3-42 QFe1.0 的化学成分 %

元素	Cu	Fe	P
成分	98.7～99.1	0.8～1.2	0.01～0.04

C19200 的成分范围：Cu 98.7%～99.19 %，Fe 0.8%～1.2 %，P 0.01%～0.04%。

（2）物理及化学性能

1）热性能　液相线温度：1 084℃。固相线温度：1 078℃。线胀系数：20～100℃时为 16.2×10^{-6} K^{-1}；比热容：20℃时为 380 J/kg；热导率：带材，20℃时为 251 W/（m·K）；管材，20℃时为 380 W/（m·K）。

2）密度　20℃的为 8.87 g/cm³。

3）电性能　电导率：带材，20℃时为 60%IACS；管材，20℃时为 50% IACS。电阻率：带材，20℃时为 0.028 8 μΩ·m；管材，20℃时为 0.034 5 μΩ·m。

（3）热加工与热处理规范

退火温度：700～815℃；热加工温度：825～950℃。

（4）力学性能

C19200 的典型力学性能见表 4.3-43。拉伸弹性模量为 115 GPa；切变模量为 44 GPa。

（5）工艺性能

可机加工性：为 C36000（易切削黄铜）的 20%。可锻性：为 C37700（锻造黄铜）的 65%。可焊性：软钎焊、硬钎焊和气体保护弧焊优，氧乙炔气焊良，不推荐保护金属弧焊、电阻缝焊、点焊和对焊。

表 4.3-43　C19200 合金的典型力学性能

状态	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa		δ_5 /%	HRB
		负荷下延伸0.5%时	残余变形0.2%时		
带材、厚度 1 mm					
O60(软退火态)	310	—	140	25	38
O82(退火到1/2硬)	395	—	305	20	55
H02(冷轧到1/2硬)	395	—	305	9	55
H04(冷轧到1/2硬)	450	—	415	7	72
H06(冷轧到硬态)	485	—	460	3	75
H08(冷轧到弹性)	510	—	490	2	76
H10(冷轧到大弹性)	530	—	510	2	77
管材,外径 48 mm×3 mm					
O50(光亮退火)	290	160	150	30	—
O60(软退火)	255	83	76	40	—
H80(冷拔,40%)	385	360	360	7	—
管材,外径 5 mm×壁厚 0.8 mm					
H55(小变形量冷加工)	290	215	205	35	

(6) QFe1.0 的选材与应用实例

典型用途：空调用轧制带材和管材以及热交换器管材以及抗软化和抗应力腐蚀的应用场合，如汽车液压制动管线，电缆包皮，断路器零件，接触弹簧，电气接插件和端子电子孔眼，挠性软管，保险丝夹，垫圈，凹型器皿（礼品），集成电路引线框架等。

4.2　铁青铜 C19210

(1) 化学成分

成分范围：0.05%～0.15%Fe，0.025%～0.04%P，余量为 Cu。

(2) 物理及化学性能

1) 热性能　液相线温度：1 082℃。线胀系数：20～300℃时为 16.9×10^{-6} K^{-1}。弹性模量：125 GPa。

2) 密度　20℃时为 8.94 g/cm^3。

3) 电性能　电导率：退火状态，20℃时为80%IACS。电阻率：退火状态，20℃时为0.021 6 μΩ·m。

(3) 力学性能

C19210 薄板的抗拉性能见表 4.3-44。

表 4.3-44　C19210 薄板的抗拉性能

状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	δ_5/%
H01（冷轧到 1/4 硬）	345	330	13
H02（冷轧到 1/2 硬）	390	385	6
H04（冷轧到硬态）	440	435	4
H08（冷轧到弹性）	490	480	2

(4) 热加工与热处理规范

热加工温度：700～900℃。退火温度：450～550℃。

(5) 工艺性能

可机加工性：C36000（易切削黄铜）的 20%。可成形性：冷热成形性好，可热锻性为 C37700（锻造黄铜）的 65%。可焊性：软钎焊、硬钎焊和金属保护弧焊优，对焊、电阻焊和氧乙炔气焊良，不推荐气体保护弧焊、点焊和电阻缝焊。

(6) C19210 应用实例

典型用途：空调器和热交换器管材，集成电路引线框架，电气接插件和端子。

4.3　铁青铜 QFe2.5（C19400）

(1) 化学成分

列入 GB/T 5233—2001 的铁青铜为 QFe2.5，其成分相当于美国的 C19400 合金，具体成分见表 4.3-45。

表 4.3-45　QFe2.5 的化学成分　　%

Fe	Zn	P	Pb_{max}	Sn_{max}	其他（杂）	Cu
2.1～2.6	0.05～0.20	0.015～0.15	0.03	0.03	0.15max	余量

(2) 物理及化学性能

1) 热性能　液相线温度：1 090℃。固相线温度：1 080℃。热导率：20℃时为 260 W/（m·K)。比热容：20℃时为 385 J/（kg·K)。线胀系数：20～300℃时为 16.3×10^{-6} K^{-1}。

2) 密度　20℃时为 8.78 g/cm^3。

3) 电性能　电导率（20℃)：O60 状态（软退火），40% IACS；H14状态（超级弹性），50%IACS（最小值）；其他状态，65%IACS（典型值），60%IACS（最小值）；在 O50（光亮退火），O80（退火到1/8硬）和 H02（1/2硬态）状态下不同机加工方法所得电导率不同，但最低为 75%IACS。

电阻率（20℃时)：O60 状态（软退火），0.043 1 μΩ·m（典型值)；H14 状态（超级弹性），0.034 5 μΩ·m（最小值)；其他状态，0.026 6 μΩ·m（典型值），在某种条件下可能仅为 0.023 0 μΩ·m。

4) 磁性能　磁导率为 1.1。

5) 化学性能　抗腐蚀能力强，基本上无应力腐蚀开裂倾向。

(3) 力学性能

QFe2.5 的典型力学性能见表 4.3-46。

表 4.3-46　QFe2.5 合金的典型力学性能

状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	HRB	疲劳强度①/MPa
板带材,厚度 0.64 mm					
O60(软退火)	310	150(max)	29(min)	38	110
O50(光亮退火)	345	160	28	45	—
O82(退火到1/2硬)	400	255	15	—	—
板带材,厚度 1 mm(0.0 in)					
H02(1/2硬)	400	315	18	68	-
H04(硬态)	450	380	7	73	145
H06(超硬)	485	465	3	74	—
H08(弹性)	505	486	3	75	148
H10(大弹性)	530	507	2max	77	141
H14(超级弹性)	500min	530min	2max	—	—
管材,外径 25 mm×壁厚 0.9 mm					
O60(软退火)	310	165	28	28	—
O50(光亮退火)	345	205	16	45	—
H55(小变形量冷拔)	400	380	9	61	—
H80(冷拔 35%)	470	455	2	73	—

① 转杆式疲劳试验确定为 10^8 周。

铁青铜带材的高温性能见表 4.3-47。

表 4.3-47 铁青铜带材的典型高温力学性能

试验温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	蠕变极限①/MPa	断裂应力②/MPa
温	341	150	—	—
65	324	144	—	—
95	313	144	—	—
120	300	144	190	—
150	289	139	171	171
175	276	135	143	148
205	266	131	124	25
230	253	131	110	105
260	235	127	96	82
290	219	123	84	65
315	203	116	74	47

① 在10 000 h试验中，每1 000 h产生两次蠕变0.01%的应力。
② 100 000 h中产生断裂的应力（由10 000 h的数据外推得到）。

弹性性能：弹性模量为121 GPa，切变模量为45.5 GPa。冲击强度：厚板，纵向冲击吸收功为144 J，横向冲击吸收功为99 J。

疲劳性能：疲劳强度见表4.3-45所示。

持久和蠕变性能：铁青铜的蠕变和应力断裂特性见表4.3-47。

(4) QFe2.5合金的工艺性能

1) 成形性 易于用多种冷热方法进行成形：冲切，造币压花，铜匠作业，拉拔，弯曲，顶锻和镦锻，热锻和热压，穿孔和冲孔，螺纹轧制和滚花，剪切、旋锻，挤压，冲压。可机加工性为C36000（易切削黄铜）的20%。

2) 可焊性 可软钎焊，硬钎焊和气体钨弧焊。

(5) QFe2.5合金的应用

适用于要求冷热加工性能良好，且强度和电导率高的场合，如断路器元件，接触弹簧，电气用夹具，弹簧和端子，挠性软管，保险丝夹，垫圈，插头，铆钉，冷凝器焊管，集成电路引线框架，电缆屏蔽等。

4.4 铁青铜 C19500

(1) C19500的化学成分

成分范围：1.3% ~ 1.7% Fe，0.6% ~ 1.0% Co，0.08% ~ 0.12%P，0.40% ~ 0.7% Sn，Zn≤0.2%，Al≤0.02%，Pb≤0.02%，其他元素分别为少于0.05%，余量为Cu。

(2) 物理及化学性能

1) 热性能 液相线温度：1 090℃。固相线温度：1 085℃。线胀系数：20 ~ 300℃时为 $16.9\times10^{-6}\ K^{-1}$。热导率：20℃时为199 W/（m·K）。

2) 质量特性 密度：20℃时为8.92 g/cm^3。

3) 电性能 电导率：退火状态，20℃为50% IACS。电阻率：20℃时为0.034 4 μΩ·m。

(3) 力学性能

C19500的典型性能见表4.3-48，拉伸弹性模量119 GPa。

表 4.3-48 C19500的典型机械性能

状态	抗拉强度/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	HRB
O61（退火态）	360（min）	170（min）	25（min）	
O50（光亮退火）	520 ~ 590	395 ~ 530	11 ~ 17	81 ~ 89
H02（1/2硬）	565 ~ 620	505 ~ 605	3 ~ 13	85 ~ 88
H08（弹性）	605 ~ 670	585 ~ 650	2 ~ 5	87 ~ 90
H10（大弹性）	670（min）	650（min）	2（max）	90（min）

(4) 加工特性

可机加工性：为C36000（易切削黄铜）的20%。可成形性：适于弯曲、造币、拉拔和冲压等成形作业。

(5) C19500的应用

用于要求有高强度和抗软化特性的电工弹簧，插座，端子，接插件，线夹及其他载流元件，适用于制造强度高，电导率高且冷热加工性能好的零件。

4.5 铁青铜 C19520

(1) 化学成分

0.5% ~ 1.5% Fe，0.3% ~ 1.5% Sn，0.01% ~ 0.35% P，余Cu。

(2) 物理及化学性能

1) 热性能 线胀系数：20 ~ 300℃时为 $16.7\times10^{-6}\ K^{-1}$；热导率：20℃时为173 W/（m·K）。

2) 密度 20℃时密度为8.8 g/cm^3。

3) 电性能 电导率：20℃时为40% IACS。电阻率：20℃时为0.049 3 μΩ·m。

(3) 力学性能

硬度和抗拉性能见表4.3-49。

弹性模量：117 GPa。

表 4.3-49 C19520带材的标准力学性能

状态	σ_b/MPa	δ_5/%	硬度 HV
H01	415	20	125
H02	440	10	140
H04	460	4	150
H06	515	2	160
H08	585	—	170
H10	640	—	180
H12	660	—	190

(4) 工艺性能

与C19400相同。

(5) C19520应用

典型用途：集成电路引线框架。

4.6 铁青铜 C19700

(1) C19700化学成分

成分范围：0.3% ~ 1.2% Fe，0.1% ~ 0.4% P，0.01% ~ 0.2%Mg，Sn和Zn≤0.2%，Co，Mn，Ni和Pb均不大于0.05%，余Cu。

(2) 物理及化学性能

1) 热性能 液相线温度：1 086℃。固相线温度：1 069℃。线胀系数：20 ~ 100℃时为 $15.8\times10^{-6}\ K^{-1}$，20 ~ 200℃时为 $16.87\times10^{-6}\ K^{-1}$，20 ~ 300℃时为 $17.3\times10^{-6}\ K^{-1}$。热导率：20℃时为320 W/（m·K）。

2) 密度 20℃时为8.83 g/cm^3。

3) 电性能 电导率：20℃时为80% IACS。电阻率：20℃时为0.021 6 μΩ·m。

(3) 力学性能

硬度和抗拉性能见表4.3-50，弹性模量为121 GPa。

表 4.3-50 C19700带材的力学性能

状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	HRB
H02	380	315	10	68
H04	450	415	6	70
H06	480	470	3	73
H08	500	490	2	75

(4) 热加工与热处理规范

热加工温度：750～950℃。退火温度：450～600℃。

(5) 工艺性能

可机加工性为C36000（易刀削黄铜）的20%。可成形性：冷热成形性优良；可焊性：软钎焊和硬钎焊优良。

(6) 应用

广泛用于成形性能好、强度和导电率高的材料，如电气电子接插件，断路器元件，保险丝夹，电缆屏蔽，引线框架。

5 镍硅青铜

镍硅青铜是Cu-Ni-Si三元系为基的合金，还含有0.1%～0.3%的Zn，Ni和Si形成化合物Ni_2Si，Cu-Ni_2Si伪二元系相图见图4.3-17。富铜角为共晶型，960℃共晶温度下，Ni_2Si在铜中的溶解度约为8.5%，室温时下降到0.5%。可见镍硅青铜是典型的时效强化型合金。镍硅青铜是一种新型大功率集成电路引线框架材料。

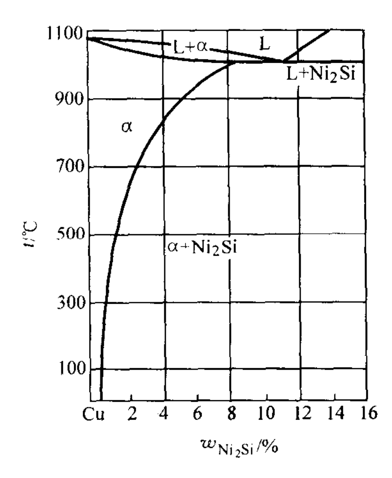


图4.3-17　Cu-Ni_2Si伪二元系相图

国外镍硅青铜牌号有C70250，国内有实验室研究成果的报道，还未见有产品出售。

5.1 镍硅青铜的化学成分

镍硅青铜的化学成分见表4.3-51。

表4.3-51　镍硅青铜C70250的化学成分　%

Ni	Si	Cu	Mg	Zn	Pb	Mo	Fe	杂质
2.2～4.2	0.25～1.2	余量	0.05～0.3	≤1.0	≤0.05	≤0.1	≤0.2	≤0.5

5.2 物理性能

1) 热性能　液相线温度：1 095℃。固相线温度：1 075℃。线胀系数：20～300℃时为17.6×10^{-6} K^{-1}。热导率：20℃时为147～190 W/(m·K)。

2) 密度　20℃时为8.80 g/cm^3。

3) 电性能　电导率：体积测定法20℃时为35%～40% IACS。电阻率：20℃时为0.043 1～0.049 3 $\mu\Omega\cdot m$。

5.3 热加工与热处理规范

热加工温度：850℃。固溶处理：880℃。时效处理：450℃，4 h。

5.4 力学性能

镍硅青铜的抗拉性能见表4.3-52所示，弹性模量为131 GPa。

表4.3-52　镍硅青铜C70250带材的抗拉性能

状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%
TM00	585	655	2
TM04	690	730	2

5.5 镍硅青铜的应用实例

镍硅青铜拥有良好的成形性，耐应力松弛性能，具有适度的导电性，用作触点弹簧，接插件和引线框架。

6 镉青铜

镉青铜是含有0.8%～1.3%Cd（质量分数）的高铜合金，Cu-Cd二元相图见图4.3-18。高温时镉与铜形成α固溶体，随温度的降低，镉在铜中的固溶度急剧下降，在300℃以下为0.5%，并析出β相（Cu_2Cd）。由于镉的含量低，析出相质点强化效果很弱，因此，合金不能通过热处理时效硬化，只能采用冷变形加工获得强化。

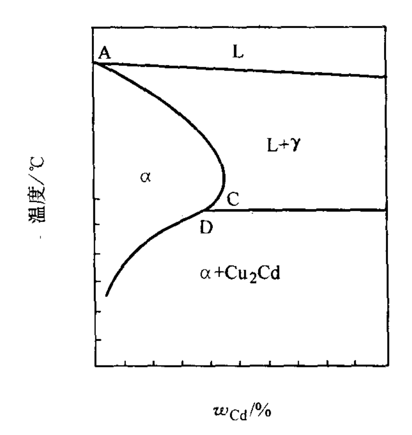


图4.3-18　Cu-Cd二元相图

镉的加入，使铜的电导率略有下降，但其强度，再结晶温度和抗高温软化能力明显提高，合金的耐热性不如铬青铜和锆青铜好，一般在300℃以下工作。

镉是一种对人体有害的元素，在熔炼时应注意防护其蒸气对人的危害。

国产镉青铜的牌号有QCd1，国外与之其相近牌号见表4.3-53，技术标准见表4.3-54。

表4.3-53　与QCd1相近的牌号

国别	美国	俄罗斯	英国	德国	日本	ISO
牌号	C16200，C16400	БрКд1	C108	CuCd1	C1620	CuCd1

表4.3-54　镉青铜技术标准

材料品种	带材	板材	棒材	线材
技术标准	GB/T 14596—1993《青铜带》	GB/T 2044—1980《镉青铜板》	GB/T 4423—1992《铜及铜合金拉制棒》 GB/T 13808—1992《铜及制铜合金挤制棒》	GB/T 14955—1994《青铜线》

6.1 镉青铜的化学成分

镉青铜的化学成分应符合 GB/T 5231—2001 的规定，具体成分见表 4.3-55。

表 4.2-55　QCd1 的化学成分　%

Cd	Cu	杂质总和
0.8～1.3	余量	≤0.3

6.2 物理及化学性能

1）热性能　液相线温度：1 076℃。固相线温度：1 040℃。热导率：20℃时 345 W/（m·K）。比热容：376.8 J/(kg·K)。线胀系数：见表 4.3-56。

表 4.3-56　QCd1 合金线胀系数

温度/℃	20～100	20～200	20～300
$\alpha/10^{-6}\ K^{-1}$	16.92	17.28	17.64

2）密度　8.40 g/cm³。

3）电性能　镉青铜的电导率见表 4.3-57，镉青铜的电阻率见表 4.3-58。20～100℃镉青铜的电阻温度系数为 $31\times10^{-4}\ K^{-1}$。

表 4.3-57　QCd1 合金电导率

θ/℃	20	100	300	500
g/%IACS	90	66	43	32

表 4.3-58　QCd1 合金的电阻率

θ/℃	20	100	300	500
$\rho/\mu\Omega\cdot m$	0.019 2	0.026 1	0.040 1	0.053 9

4）化学性能　抗氧化性能：类似纯铜。耐腐蚀性能：类似纯铜，抗电蚀性能优于纯铜。

6.3 热加工与热处理规范

热加工温度范围：750～875℃。退火：400～600℃，炉冷或空冷。

6.4 镉青铜的力学性能

(1) 技术标准规定的性能（表 4.3-59）

表 4.3-59　QCd1 合金的力学性能

品种	状态	厚度或直径 /mm	σ_b/MPa ≥	δ_{10}/% ≥	HBS	技术标准
带材	Y	0.3～1.2	392	—	—	GB/T 14596—1993
板材	Y	0.5～10	390	—	—	GB/T 2044—1980
棒材	R	20～120	196	35	≤75	GB/T 13808—1992 GB/T 4423—1992
	M	5～60	215	35	≤75	
	Y	5～60	370	4	≥100	
线材	M	0.1～6.0	275	20（1～100 mm）	—	GB/T 14955—1994
	Y	0.1～0.5	590～880	—	—	
		>0.5～4.0	490～735	—	—	
		>4.0～6.0	170～685	—	—	

(2) 室温及各种温度下的力学性能

1）硬度　供应状态镉青铜硬度见表 4.3-60，硬度随试验温度的变化如图 4.3-19 所示。

表 4.3-60　QCd1 合金供应状态的硬度

品种	状态	HB	HRF	HRB
板、带材	M	—	47	—
	Y			65～75
棒材	M	50～61	50	—
	Y	—	—	55～73
	R	52～60	—	—

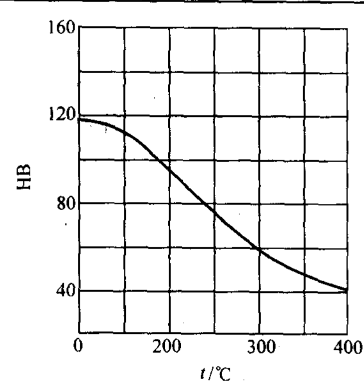


图 4.3-19　QCd1 合金硬度随试验温度的变化

2）室温拉伸性能见表 4.3-61。不同变形率对室温镉青铜拉伸性能的影响如图 4.3-20，不同退火温度对合金室温拉伸性能的影响如图 4.3-21 所示。

表 4.3-61　供应状态 QCd1 合金的拉伸性能

品种	状态	σ_b/MPa 平均	σ_b/MPa min	σ_b/MPa max	δ/% 平均	δ/% min	δ/% max
板材	M	255	—	—	50	—	—
	Y	435	400	480	5	3	8
棒材	M	250	215	275	50	38	57
	Y	460	385	590	8	6	11
	R	250	215	275	46	31	51
线材	Y	580	550	600	—	—	—

3）高温拉伸性能　镉青铜的高温性能良好，试验温度对拉伸性能的影响见表 4.3-62。

冷加工 44%的 QCd1 在 20～300℃的性能见表 4.3-63。

镉青铜 QCd1 的力学性能与加工率的关系如图 4.3-22 所示。

QCd1 的抗拉强度与加工率和退火温度的关系见图 4.3-23。

冷加工 44%的 QCd1 合金 200～300℃的蠕变性能见表 4.3-64。

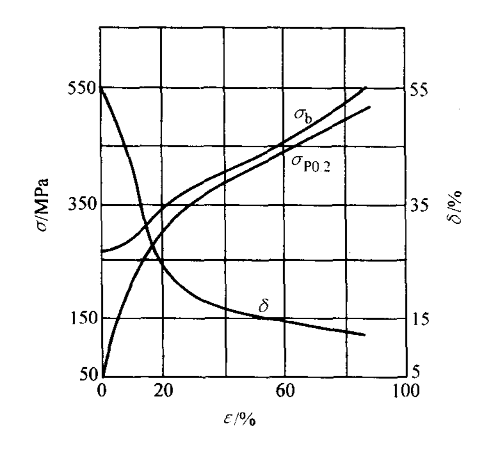


图4.3-20　QCd1合金的拉伸性能与冷变形率的关系

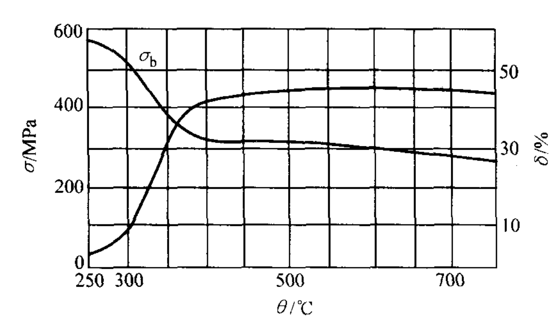


图4.3-21　QCd1合金的拉伸性能与退火温度的关系

表4.3-62　QCd1合金的高温拉伸性能

θ/℃	200	300	400	500	600	700
σ_b/MPa	360	304	225	95	70	45
$\sigma_{p0.2}$/MPa	345	270	170	—	50	30
δ/%	15	17	31	64	95	139

表4.3-63　冷加工44%的QCd1在20～300℃的性能

试验温度/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	HB	ρ/%IACS
室温	395	390	16.9	124	84.3
200	367	351	15.0	—	—
300	310	275	17.0	—	—

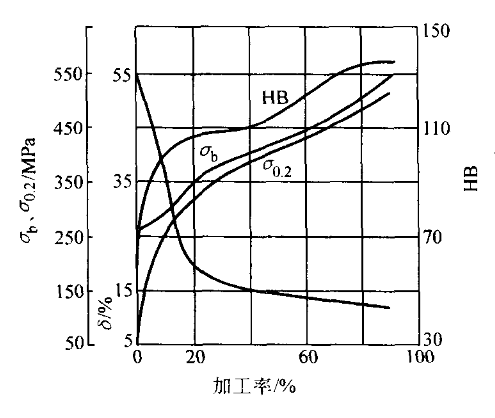


图4.3-22　镉青铜QCd1的力学性能与加工率的关系

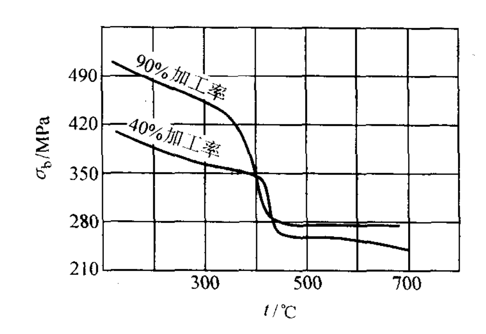


图4.3-23　镉青铜的抗拉强度与加工率、退火温度（保温30 min）的关系

表4.3-64　冷加工44%的QCd1的合金200～300℃的蠕变性能

试验温度/℃	施加应力/MPa	试验时间/h	永久变形/%
200	140	3 018	0.19
	161	2 512	0.22
	179	3 018	0.29
	200	2 655	0.35
250	122	4 276	0.29
	138	4 276	0.41
	140	5 010	0.51
	160	1 747	0.56
	179	1 747	1.42

高周疲劳条件下镉青铜棒材的强度变化如图4.3-24所示。

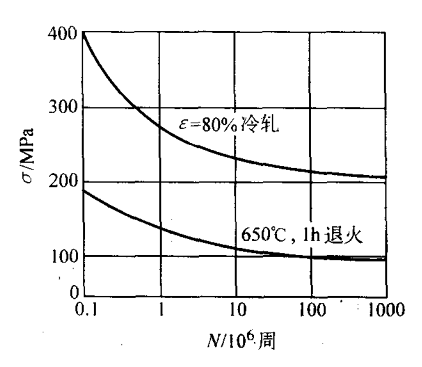


图4.3-24　QCd1合金的疲劳强度

扭转与剪切性能：软态合金的抗剪强度为185 MPa，合金的抗剪强度为385 MPa。

弹性模量：123.5 GPa（硬态棒）。

切变模量：44.1 GPa（硬态棒）。

6.5　镉青铜的工艺性能

1）熔炼与铸造工艺　合金通常采用工频有芯感应炉熔炼，熔池用经煅烧的木炭覆盖。在用磷铜预脱氧后镉以Cu-Cd中间合金的形式加入。镉烟对人体有害，应尽可能减少镉的氧化挥发。用烟灰覆盖在半连续铸造条件下铸锭，铸造温度为1 230～1 270℃。

2）成形性能　合金具有良好的冷、热加工性能。能承受热挤、热轧、热弯、锻造和多种形式的冷变形加工，变形率可达90%以上。

3）焊接性能　合金焊接性能良好，易于熔焊，钎焊，也可进行闪光焊和点焊。

4）切削加工与磨削性能　合金的切削加工性为易切削黄铜HPb63-3的20%。

6.6 镉青铜的应用实例

镉青铜的材料种类有板、棒、线三种，它们有高导电性和导热性，良好的耐磨性，减摩性，耐蚀性和加工性，广泛用于制造电工装置的导电，耐热，耐磨零件。主要用途有：电机整流子、开关元件，弹簧接点，波导腔，较高强度的传输线，接头及接触焊机电极和滚轮等。

7 镁青铜

镁青铜是铜-镁系二元合金。铜-镁系二元合金相图见图4.3-25。镁在铜中的溶解度随温度下降而减少，在共晶温度722℃下的极限溶解度为3.3%。含2.5%～3.5%Mg的铜合金可通过γ相（$MgCu_2$）的沉淀而产生时效强化，但γ相是一种既脆又硬的相，合金的加工成形性能随着γ相的增加而急剧下降。因此，有实际应用意义的Cu-Mg合金的镁含量不大于1%，这类合金只能用加工硬化来提高强度。

元素Mg的加入使铜的导电性略有降低，热传导性，耐热性能则优于镉青铜，并有一定的抗扭转性和抗腐蚀性。微量镁加入还有一定的脱氧作用，对铜的高温抗氧化性也有益。镁青铜冷、热加工性能较好，产品一般以线材供应。一般用做电缆及其他导电材料，在许多方面可以代替镉青铜。

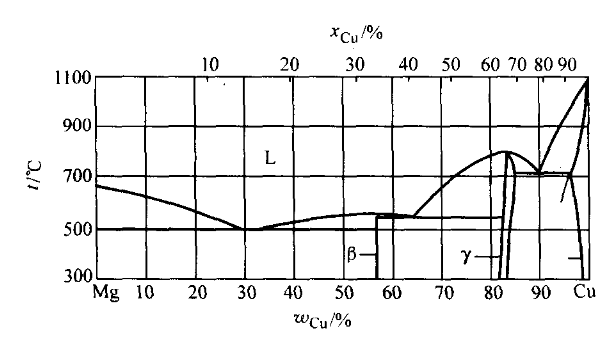


图4.3-25 铜-镁系二元合金相图

国产镁青铜的牌号有QMg0.8，国外与之相近的牌号有俄罗斯的БрМр0.8，德国的CuMg0.7。

7.1 镁青铜的化学成分

化学成分应符合GB/T 5233—2001的确定，具体成分见表4.3-65。

表4.3-65 镁青铜的化学成分 %

合金元素		杂质 ≤								
Mg	Cu	Sn	Zn	Fe	Pb	Sb	Bi	Ni	S	杂质总和
0.70～0.85	余量	0.002	0.005	0.005	0.005	0.005	0.002	0.006	0.005	0.03

7.2 物理及化学性能

1）热性能 熔化温度范围约1 010～1 070℃。

2）电性能 电阻率 $\rho=0.033\sim0.034\ \mu\Omega\cdot m$。

3）化学性能 抗氧化性能：高温抗氧化性能优于纯铜。耐腐蚀性能：耐大气腐蚀。

7.3 镁青铜的热加工与热处理规范

热处理制度：合金不能热处理强化，中间退火温度为500～540℃。

7.4 镁青铜的力学性能

1）镁青铜技术标准规定的性能见表4.3-66。

表4.3-66 技术标准规定的性能

品种	d/mm	状态	σ_b/MPa	δ_{10}/% ≥	$\delta_i/\sigma_b\times100$	技术标准
线材	0.34，0.37	Y	788	0.5	48	LTJ501—1985

注：δ_i 是打结强度。

2）室温及各种温度下的力学性能 QMg0.8合金线材的拉伸性能与变形率的关系见图4.3-26。

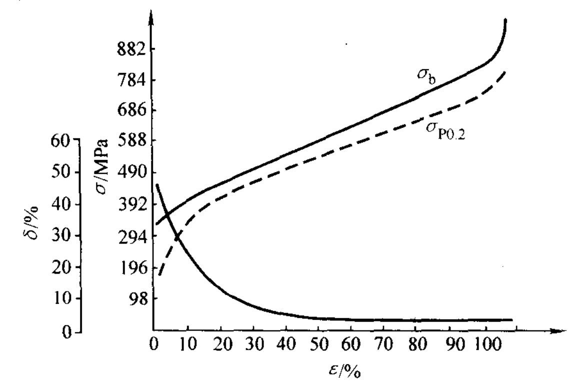


图4.3-26 QMg0.8合金线材的拉伸性能与变形率的关系

3）扭转和剪切性能 扭转试验按GB/T 239—1999《金属线材扭转试验方法》进行，线材扭转不小于25次/360°。

7.5 镁青铜的工艺性能

熔炼与铸造工艺：由于合金中的镁易氧化烧损，熔炼与铸造难度较大。一般采用真空熔炼。先加铜熔化，精炼后加氩气保护，然后加镁浇铸。采用铸铁模浇铸。铸造温度1 170～1 200℃。

成形性能：合金具有较好的冷热加工性能，冷变形程度可达99%以上。

7.6 镁青铜的选材与应用实例

镁青铜多以线材形式供应，主要用于制造电缆、飞机天线等导电元件。

8 Cu-Ag-Zr合金

Cu-Ag-Zr合金是添加少量Ag和锆的三元系铜合金，Cu-Ag-Zr三元系相图见图4.3-27。

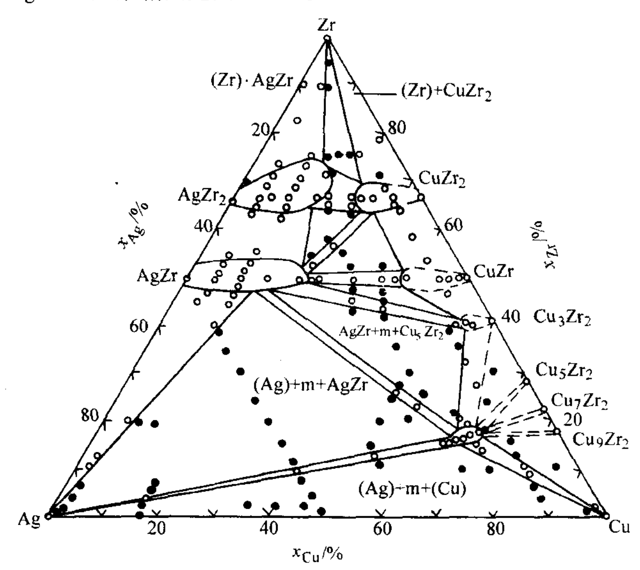


图4.3-27 Cu-Ag-Zr三元系相图室温截面

779℃共晶温度下，Ag在Cu中的溶解度为7.9%，随温度降低，Ag在Cu中的溶解度显著下降，300℃时0.2%，室温下只有0.1%，从Cu-Zr相图看，965℃下Zr在Cu中最大溶解度为0.11%～0.13%，500℃时下降低到0.01%。因此，Cu-Ag-Zr合金可通过固溶－时效处理得到强化，析出相为Ag和Cu_3Zr相，Ag的加入稍许降低铜的导热性，但显著提高铜的再结晶温度、蠕变强度和抗高温热低周疲劳性能。Cu-Ag-Zr合金是航天飞行的液体火箭发动机燃烧室内壁理想的高强导热材料。

国产银锆青铜牌号为QAg3-0.5，美国牌号为Narlog-Z。

8.1　合金的化学成分

成分：3.0%～3.5%Ag，0.4%～0.7%Zr，余Cu；杂质含量P≤0.002%，S≤0.005%，Pb≤0.003%，Fe≤0.004%，Ni_2As，Sb，Sn单个元素≤0.002%，Bi≤0.001%。

8.2　物理及化学性能

1）热性能　比热容：20～100℃平均比热容为381.0 J/(kg·K)，20～600℃平均比热容为401.9 J/(kg·K)。热导率：20℃时为352 W/(m·K)，600℃时为335 W/(m·K)。线胀系数：20～100℃，平均线胀系数为$13.8\times10^{-6}\ K^{-1}$，20～800℃，平均线胀系数为$18.4\times10^{-6}\ K^{-1}$。弹性模量：20℃时为124 GPa，300℃时为115 GPa，600℃时为98 GPa。

2）密度　20℃时为9.03 g/cm³。

3）电性能　电导率：90% IACS。

4）化学性能　抗氧化性能：抗氧化性能优良。耐腐蚀性能：耐大气腐蚀。

8.3　力学性能

合金板材室温力学性能见表4.3-67。棒材室温力学性见表4.3-68，合金高温力学性能见表4.3-69。

表4.3-67　QAg3-0.5板材室温力学性能（纵向）

板厚/mm	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_{10}/%	ψ/%
12	热轧退火	296	111	35	43.5
12	950℃ 1 h，水淬+500℃ 8 h时效	305	174	37.5	57.5
4	同上	306	184	34	47.8
4	950℃ 1 h，水淬+475℃ 8 h时效	309	191	29	—
1.5	同上	306	190	35.6	—
1.5	950℃ 1 h水淬+50%冷变形+475℃ 8 h时效	404	306	19.7	—

表4.3-68　QAg3-0.5棒材室温力学性能

直径/mm	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_{10}/%	ψ/%
d_{30}挤压棒	挤压态	310	185	30	64
d_{20}锻棒	950℃ 60 min水淬+480℃ 6 h时效	325	205	30	63

表4.3-69　3 mm厚QAg3-0.5冷轧板经固溶时效后的高温拉伸性能①

温度/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
室温	321	234	28	31.5
100	277	174	33	45

续表4.3-69

温度/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
200	256	164	30.2	40.5
300	240	150	24.7	37.5
400	214	177	41.4	27.2
500	170	154	45.1	42.5
550	127	113	55	30.0
600	97	92	62.7	39.3

①　950℃ 1 h水淬+480℃ 6 h时效。

8.4　工艺性能

熔炼与铸造工艺：Cu-Ag-Zr合金中含贵金属Ag，其中Zr极易氧化和吸气，此外，这种合金对杂质控制要求严，为了减少氧化和提高铸锭质量，熔炼铸造通常在真空感应炉内进行，熔炼温度1 250～1 300℃。

加工性能：Cu-Ag-Zr合金热力加工性能和冷加工性能良好，铸锭热轧加热温度为800～850℃，铸锭挤压加热。

8.5　热加工与热处理规范

退火温度：600℃，1 h。热加工温度：800～850℃。固溶处理：940℃，60 min，水淬。时效处理：475℃，8 h，空冷。

8.6　应用实例

国产Qag3-0.5合金已成功用于大推力液氢-液氧发动机燃烧室结构材料。

9　钴铬硅青铜

钴铬硅青铜是添加少量Co、Cr和Si的高铜合金，为了改善合金的热锻性能还加入微量Nb。固溶后时效处理，抗高温软化温度为550～620℃。这种合金的相组织结构为Cu固溶体，Co_2Si相和$Cr_3CO_5Si_2$相。从Cu-Co_2Si的伪二元相图（图4.3-28）可知，Co_2Si能与铜形成固溶体，其固溶度随温度下降而急剧减少。Cu-Co-Cr-Si合金除具有Cu-Cr和Cu-Co-Si合金的相成分和性能特征外，还可能生成新的相，且各个元素及相之间会产生交互作用，这些都会影响合金的最终性能。合金的强度提高，有高的耐热性，是制造要求高温抗软化性良好的导电结构材料。

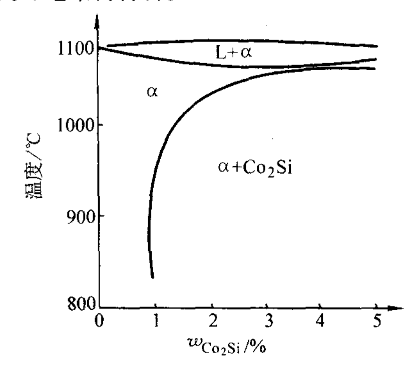


图4.3-28　Cu-Co_2Si伪二元相图

国产Cu-Co-Cr-Si合金的商业代号为航空DJ100，为改善合金锻造性能添加某些微量元素的材料代号为航空DJ101，也按钴铬硅青铜技术要求供应。

9.1　合金的化学成分

Cu-Co-Cr-Si合金的化学成分见表4.3-70。

表 4.3-70 铜钴铬硅合金的化学成分 %

元素	Co	Cr	Si	Nb	Cu
质量分数	2.3	0.8	1.0	0.05	余量

9.2 物理及化学性能

1）密度 20℃时为8.8 g/cm³。

2）电性能 电导率：20℃下固溶－时效态为47%IACS，固溶－50%冷变形－时效态为43%IACS。

3）化学性能 抗氧化性能：抗氧性能良好。耐腐蚀性能：耐大气腐蚀。

9.3 热加工与热处理规范

热加工温度：820～880℃。固溶处理：980℃，60 min，冰盐水淬火。时效处理：480℃，4 h，空冷。

9.4 力学性能

固溶温度对合金硬度、拉伸力学性能和电导率的影响见图 4.3-29，时效温度对合金性能的影响见图 4.3-30。固溶后预冷变形对合金力学性能和电学性能的影响见图 4.3-31 和表 4.3-71。

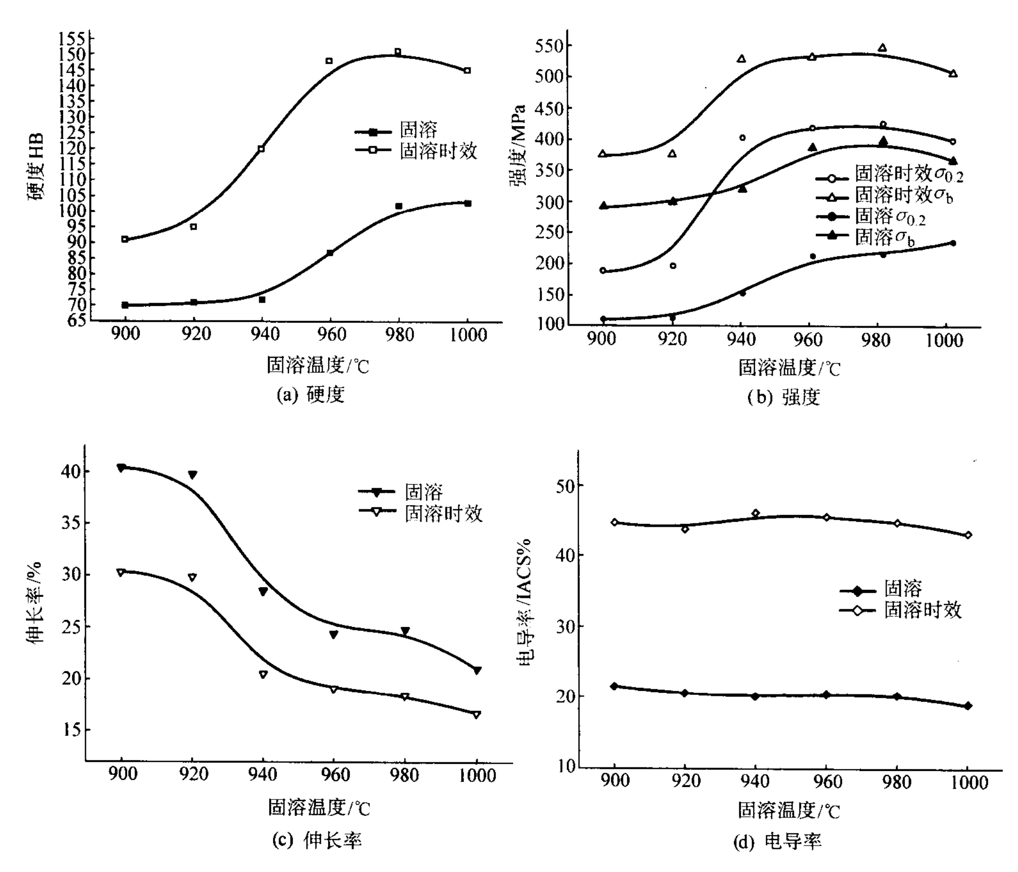


图 4.3-29 固溶温度对合金硬度、拉伸力学性能和电导率的影响（470℃，4 h时效）

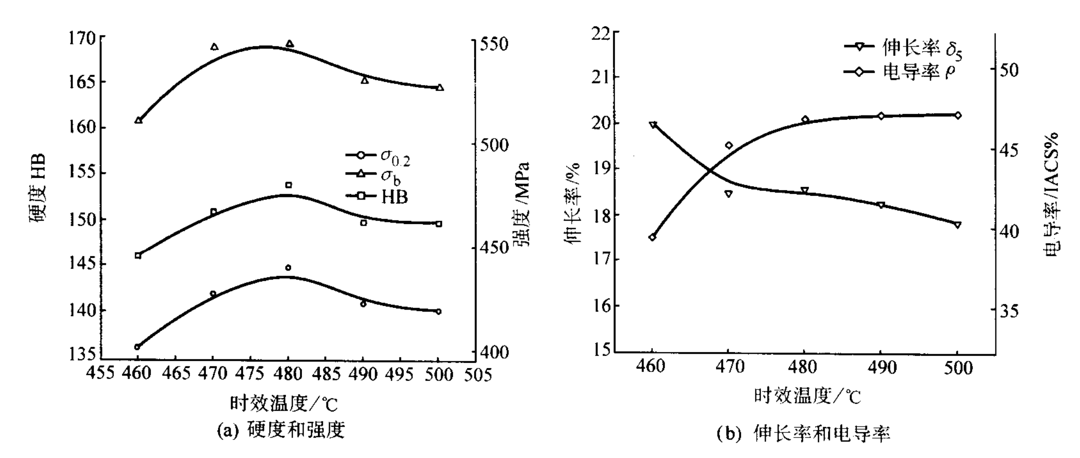
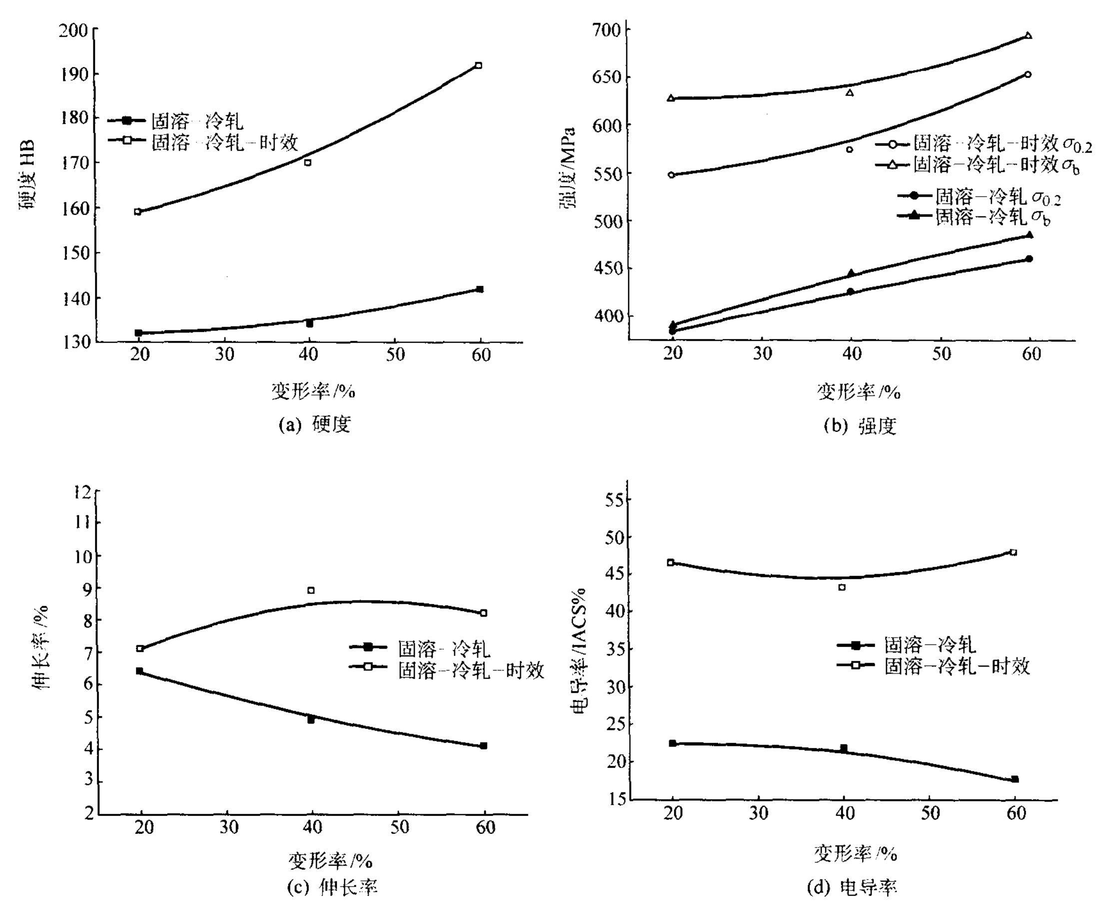


图 4.3-30 时效温度对合金硬度、拉伸力学性能和电导率的影响
（980℃，60 min，冰盐水淬火，时效 4 h）



(a) 硬度　(b) 强度

(c) 伸长率　(d) 电导率

图 4.3-31　固溶后预冷变形对合金力学性能和电学性能的影响

表 4.3-71　冷变形量对合金力学性能和电学性能的影响

（固溶 980℃ 60 min，冰盐水淬火，时效 480℃ 4 h）

变形量	状态	HB	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%	ρ/% IACS
20%	冷轧态	132	385	391	6.4	22.4
	时效态	159	548	628	7.1	46.5
40%	冷轧态	134	446	427	4.9	21.9
	时效态	170	575	634	8.9	43.2
60%	冷轧态	142	462	486	4.1	17.8
	时效态	192	655	695	8.2	48

9.5　工艺性能

熔炼与铸造工艺：熔炼在中频感应炉中进行，熔炼温度 1 250 ~ 1 300℃。

成形性能：采用半连续铸造成锭。铸锭可采用热锻开坯，做成盘状，锻造温度为 700 ~ 900℃。也可以成杆状，之后进行冷拉。

9.6　应用实例

钴铬硅铜不仅可用于加工电阻焊电极、滚轮和电极块，还可用来加工水平连续浇铸的结晶器。这种合金有高的强度和抗高温软化性能，导电性也较好，可代替铜钴铍合金用作电焊滚轮和导电焊嘴。

编写：尹志民（中南大学）
审稿：唐仁政（中南大学）

第4章　结构黄铜

黄铜包括铜-锌二元合金（称普通黄铜）和铜锌中加有其他组元的多元合金（称为特殊黄铜或复杂黄铜）。我国国标中黄铜合金牌号有43个，其中普通黄铜10个，复杂黄铜33个。主要的商业复杂黄铜有铅黄铜、铝黄铜、铁黄铜、锰黄铜、锡黄铜、硅黄铜和镍黄铜等。

黄铜有良好的力学性能、工艺性能和耐蚀性，有的还有较高的导电性能，或切削性能、耐磨性能，是铜合金中用途最广泛的材料。

人们对普通黄铜的认识已经相当深入，黄铜的应用也有很长的历史和广阔的范围。但对复杂黄铜的研究仍方兴未艾，正向着四个或四个以上组元合金的方向发展。一批如同步器齿环和液压泵摩擦副用五组元或六组元复杂黄铜材料的不断开发成功就是很好的例证。

1　普通黄铜

铜锌二元合金中，锌大量溶解于铜中（见图4.4-1），但

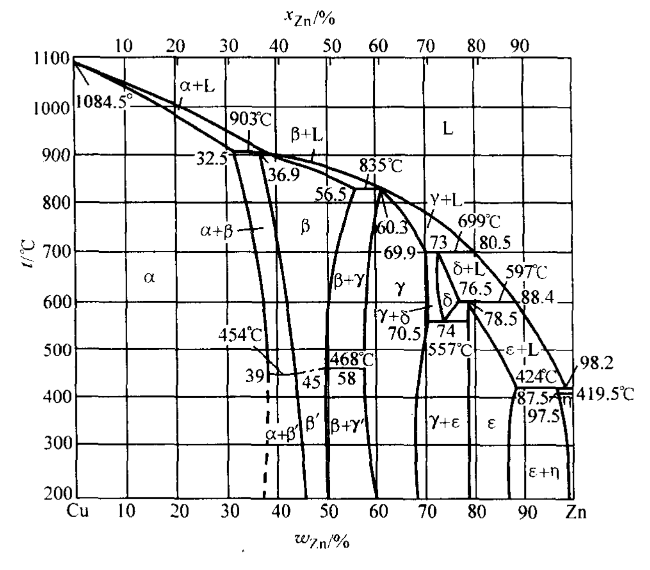


图4.4-1　铜锌相图

有实际应用的是含锌在50%以内的黄铜，共有十个牌号。普通黄铜通常有α和β两种相：按组织分，普通黄铜有α单相黄铜（H96、H90、H85、H80、H70、H68）、α+β两相黄铜（H63、H62、H59）和β相黄铜。由于β相黄铜锌含量在46.5%～50%，塑性很低只作焊料使用，故标准中没有β单相黄铜的牌号。在454～468℃有β（无序固溶体）→β′（有序固溶体）转变。各相的结构特征见表4.4-1。α黄铜塑性好，易于热态和冷态加工。

表4.4-1　普通黄铜中相的结构特征

锌含量（摩尔分数）/%	相的名称	电子化合物	晶格类型	晶格常数
0～38	α	—	面心立方	3.608～3.693
45～49	β	CuZn　3/2	无序体心立方	2.942～2.949
	β′	CuZn　3/2	有序体心立方	2.942～2.949

1.1　合金牌号、特点和应用

普通黄铜的牌号、特点和应用见表4.4-2。

1.2　化学成分

普通黄铜的化学成分见表4.4-3。

1.3　物理及化学性能

普通黄铜的物理性能见表4.4-4，化学性能见表4.4-5。

在大气中黄铜腐蚀得很慢，在淡水中黄铜的腐蚀速度也不大，在海水中则有可能达到0.1 mm/a。随着温度的升高腐蚀速度会加快，湿饱和蒸汽在高速时能引起冲击腐蚀。在坑内地下水中有$Fe_2(SO_4)_3$离子时黄铜极易腐蚀。

黄铜特别是高锌黄铜易发生脱锌腐蚀和应力腐蚀破裂。为防止脱锌腐蚀，可在黄铜中加入不大于0.05%的砷。为防止应力腐蚀破裂，黄铜制品和半成品必须进行低温退火，以消除内应力。

黄铜不应和铁、铝、锌接触，因为它们会迅速腐蚀。反过来，用铁、铝、锌作牺牲阳极可以保护黄铜。

表4.4-2　普通黄铜的牌号、特点和应用

合金牌号	主要特性	应用举例
H96	具有良好的冷热加工性能，易焊接，表面工程特性良好，在大气和淡水中不腐蚀，无应力腐蚀破裂倾向，有庄重的古铜色泽	货币、纪念品、徽章、引信帽、起爆器、珐琅底胎、波导管、散热管、导电器件等
H90	有良好的力学性能和压力加工性能，耐蚀性好，能镀金、涂敷珐琅	装饰品、奖章、船用构件、铆钉、导波管、水箱带、电池帽、水道管等
H85	有足够的力学性能和耐蚀性，易成形	建筑装饰、徽章、波纹管、蛇形管、水道管、挠性软管、冷却设备制件等
H80	有良好的力学性能，在冷热状态下加工性能好，在大气、淡水和海水中有较高的耐蚀性	标牌标签、浮雕、电池帽、乐器、挠性软管、泵用管等
H70	有较好的塑性和较高的强度，易焊接，耐蚀性好，在氨气气氛中应力腐蚀开裂十分敏感	弹壳、汽车水箱、五金制品、卫生管道配件等
H68	具有良好的塑性和较高的强度，切削性好，易焊接，耐蚀，易成形	各种冷冲件和深冲件、散热器外壳、波纹管、门、灯具等

续表 4.4-2

合金牌号	主要特性	应用举例
H65	有足够的力学性能和工艺性能，有美丽的金黄色光泽	各种五金制品、灯具、管道配件、拉链、牌匾、铆钉、弹簧、沉降过滤器等
H63	有足够的力学性能和工艺性能，耐蚀性一般	各种浅冲件、制糖管件、垫片等
H62 H59	有较高的机械强度，热塑性尚好，切削性能好，在某些情况下易脱锌和应力开裂	各种结构件、制糖热交换器管、销钉、夹线板、垫圈等

表 4.4-3 普通黄铜的化学成分 %

合金牌号	Cu	Fe	Pb	Ni	Zn	杂质总和	合金牌号	Cu	Fe	Pb	Ni	Zn	杂质总和
H96	95.0~97.0	0.10	0.03	0.5	余量	0.2	H68	67.0~70.0	0.10	0.03	0.5	余量	0.3
H90	88.0~91.0	0.10	0.03	0.5	余量	0.2	H65	63.5~68.0	0.10	0.03	0.5	余量	0.3
H85	84.0~86.0	0.10	0.03	0.5	余量	0.3	H63	62.0~65.0	0.15	0.08	0.5	余量	0.5
H80	79.0~81.0	0.10	0.03	0.5	余量	0.3	H62	60.5~63.5	0.15	0.08	0.5	余量	0.5
H70	68.5~71.5	0.10	0.03	0.5	余量	0.3	H59	57.0~60.0	0.30	0.50	0.5	余量	1.0

表 4.4-4 普通黄铜的物理性能

合金牌号	熔化温度/℃		沸点/℃	密度 /g·cm^{-3}	比热容 /J·(kg·K)$^{-1}$	线胀系数 /10^{-6}K^{-1}	热导率 /W·(m·K)$^{-1}$	电导率 /%IACS	电阻率/μΩ·m		电阻温度系数 /K^{-1}
	液相线温度	固相线温度							固态	液态	
H96	1 071.4	1 056.4	-1 600	8.850	93	18.0	243.9	57	0.031	0.24	0.002 7
H90	1 046.4	1 026.3	-1 400	8.800	95	18.4	187.6	44	0.040	0.27	0.001 8
H85	1 026.3	991.0	-1 300	8.750	95	18.7	151.7	37	0.047	0.29	0.001 6
H80	1 001.2	966.0	-1 240	8.660	93	19.1	141.7	32	0.054	0.33	0.001 5
H75	981.2	—	—	8.630	—	19.6	120.9	30	0.057	—	—
H70	951.0	916.0	-1 150	8.530	90	19.9	120.9	28	0.062	0.39	0.001 5
H68	939.0	910.0	—	8.500	—	20.0	116.7	27	0.064	—	0.001 5
H65	936.0	906.0	—	8.470	—	20.1	116.7	27	0.069	—	—
H63	911.0	901.0	—	8.430	—	20.6	116.7	27	—	—	—
H62	906.0	899.0	—	8.430	—	20.6	116.7	27	0.071	—	0.001 7
H59	896.0	886.0	—	8.400	—	21.0	125.1	—	—	—	0.002 5

表 4.4-5 黄铜的化学性能

合金牌号	腐蚀介质	腐蚀速度/mm·a^{-1}	介质浓度/%	温度/℃	试验时间/h
各种黄铜	农村大气	0.000 1~0.000 75	—	—	—
各种黄铜	城市和海滨大气	0.001 2~0.003 8	—	—	—
各种黄铜	低速干燥纯净蒸汽	≤0.002 5	—	—	—
各种黄铜	常温纯净淡水	0.002 5~0.025	—	—	—
各种黄铜	常温海水	0.007 5~0.1	—	—	—
各种黄铜	土壤水	3.0	—	20	—
各种黄铜	纯磷酸溶液	0.5	—	—	—
各种黄铜	苛性钠溶液	0.5	—	—	—
各种黄铜	含空气或较高温苛性钠溶液	1.8	—	—	—
各种黄铜	脂肪酸	0.25~1.3	—	—	—
各种黄铜	静置醋酸	0.025~0.75	—	20	—
各种黄铜	甲醇、乙醇、乙二醇	0.000 5~0.006	—	—	—
各种黄铜	苦味酸	4.3	—	250	—
H62	硫酸	0.01~0.2	0.01~0.05	20	336~840
H68	硫酸	0.05	0.01	50	336
HFe59-1-1	硫酸	0.14	0.5	190	100
HSn70-1	硫酸	0.6~1.0（增速）	浓的	20~40	720
HSn60-1	硫酸	0.36	2	80	500

1.4 热加工和热处理规范

普通黄铜的热加工工艺制度因铸锭锭坯尺寸和炉型不同而不尽相同。推荐的加热温度范围和应用实例见表4.4-6～表4.4-8。

表4.4-6 普通黄铜的热加工和热处理制度 ℃

合金牌号	铸造温度	热变形温度	再结晶开始温度	完全再结晶退火温度	消除残余应力退火温度
H96	1 160～1 200	750～850	300	450～600	300
H90	1 160～1 200	750～900	335～375	650～720	200
H85	1 150～1 180	830～900	335～370	560～720	200
H80	1 160～1 180	820～870	320～360	650～720	200
H70	1 100～1 160	750～830	320～360	650～720	200
H68	1 100～1 160	750～830	300～370	520～650	260～270
H65①	1 100～1 160	750～830	300～370	520～650	260～270
H63	1 060～1 100	650～850	350～370	660～670	300①
H60	1 030～1 080	730～820	350～370	660～670	—

① 薄带材除外。

表4.4-7 普通黄铜挤压加热工艺规范举例

合金牌号	推荐加热温度/℃	品种	锭坯规格/mm	出炉温度/℃	加热时间/h
H62	625～800	棒	≤245	640～690	1.0～2.0
H63			>245	660～710	1.5～2.6
H65	700～820	管	≤245	700～760	1.0～2.0
			>245	720～780	1.5～2.5
H68	720～800	棒	≤245	700～750	1.0～2.0
H70			>245	720～770	1.5～2.5
		管	≤245	740～780	1.0～2.0
			>245	790～850	1.5～2.5
H80	825～900	棒	≤245	850～900	1.0～2.0
H85			>245	870～920	1.5～2.6
H90	800～900	管	≤245	870～920	1.5～2.5
			>245	890～940	2.0～3.0
H96	750～870	棒	≤245	790～840	1.5～2.5
			>245	820～870	2.0～3.0
	870～970	管	≤245	870～950	1.5～.25
			>245	890～970	2.0～3.0

表4.4-8 普通黄铜热轧加热规范举例

合金牌号	推荐温度/℃	Ⅰ区温度/℃	Ⅱ区温度/℃	加热时间/h	出炉温度/℃
H96	750～875	850～950	820～930	2.0～2.5	780～870
H90	750～875	900～950	850～950	2.0～2.5	850～900
H85	800～900	900～950	850～950	2.0～2.5	850～900
H80	825～900	850～900	840～880	2.0～2.5	800～850
H70	725～820	850～900	820～860	2.0～2.5	780～840
H668	725～820	850～900	820～860	2.0～2.5	780～840
H65	700～820	820～870	800～840	2.0～2.5	780～840
H63	700～820	820～870	800～840	2.0～2.5	780～840
H62	625～800	850～880	800～860	2.0～2.5	800～850

普通黄铜的热处理主要是中间退火和成品退火，应用实例见表4.4-9～表4.4-11。

表4.4-9 带卷在周期式推料电阻炉中中间退火应用实例

合金牌号	带材厚度/mm	退火温度/℃	推料周期/卷·h^{-1}
H96、H90、H85、H80	1.5～3.5	540	3
H70、H68	1.7～3.5	580	3
H65、H63、H62、H59	1.7～3.5	580	3

表4.4-10 带卷在气垫式退火炉中退火应用实例

合金牌号	带卷厚度/mm	状态	炉温/℃	速度/m·min^{-1}
H65		S	730	17
H68	0.25	Y_4	700	27
H70		中间退火	730	19
H63		S	700	15
H62	0.5	Y_4	550	20
H59		中间退火	700	20
H90	0.5	S	600	13
		Y_2	500	13

表4.4-11 普通黄铜管材在电阻炉内退火应用实例

合金牌号	规格/mm	退火温度/℃			保温时间/min
		中间退火	M	Y_2	
H96	$\phi25\times1$	520～550	420～480	380～400	45～60
H68	$\phi35\times1.8$	580～620	500～520	450～480	80～90
H62	$\phi105\times5$	580～630	520～550	490～520	80～90

1.5 力学性能

黄铜的力学性能随锌含量的增加而改变，见图4.4-2。从图中可见普通黄铜的强度随锌含量的增加而提高，而塑性随锌含量增加而降低，在含锌15%（H85）时到达低谷。随锌含量的继续增加，塑性随之提高，含量达到32%（H68）

时到达峰顶。普通黄铜的室温、高温和低温力学性能分别见表4.4-12、表4.4-13和表4.4-14。

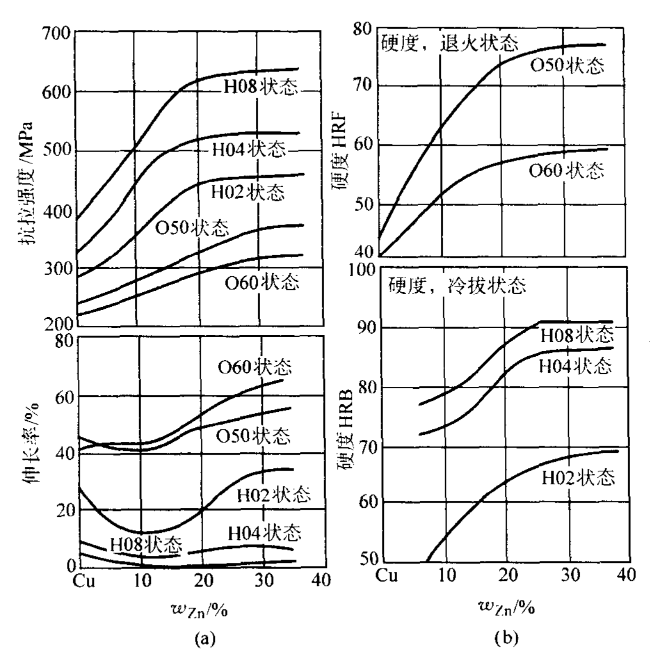


图4.4-2　锌含量对黄铜力学性能的影响

1.6　工艺性能

普通黄铜因为凝固温度范围小、偏析倾向小、流动性好，具有较好的可铸性。锌有脱气作用，不易形成分散的气孔。

单相α黄铜塑性好，可冷热压力加工。其室温延伸率随锌含量的增加而堤高，如图4.4-2。α黄铜热轧前的加热既可以使之软化，又能消除高锌黄铜在非平衡状态结晶时出现的少量β相，进一步改善室温塑性。β相在高温下比α相软化得更快，因此，双相黄铜的热加工性能也很好。

所有黄铜在200~700℃之间的某一温度范围内均存在一个脆性区。因此热轧应在脆性区的温度范围以上进行。

黄铜在热挤压时易出现层状断口，这主要是因为晶界上存在显微缩孔或低熔点杂质。

黄铜的冷态压力加工性能与其成分和组织有关。α黄铜具有较高的室温塑性，两次中间退火之间的加工率可达70%（对深冲用板带材）或90%（对线材），双相黄铜则易于加工硬化。

在相同的冷加工率下，黄铜的再结晶温度随含锌量的增加而降低。在生产条件下，常应用500~700℃退火，可获得等轴的α晶粒。大加工率的两相黄铜在退火时，α相约在300℃时即开始再结晶，而β相需在更高的温度才开始再结晶。因此在生产条件下一般采用600~700℃退火。

普通黄铜的焊接性能和镀锡、镀镍等表面工程特性良好。普通黄铜的切削性能随锌含量的增加而提高，见表4.4-15。

表4.4-12　普通黄铜的室温力学性能

合金牌号	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	弹性极限/MPa	疲劳强度/MPa	疲劳试验循环次数/10^{-6}周	伸长率/%	断面收缩率/%	冲击韧度/J·cm^{-2}	硬度HRB
H96	115	240/450	—/390	35/360	—	—	50/2	—	220	—
H90	115	260/480	120/400	40/380	8.5/12.6	50/50	45/4	80	180	53/130
H85	115	280/550	100/450	40/450	10.6/14	100/300	45/4	85	—	54/126
H80	1110	320/640	120/520	80/420	10.5/15.4	90/50	52/5	70	160	53/145
H75	110	340/590	110/540	80/450	12/15	—	58/6	—	—	—
H68	106	320/660	90/520	70/500	12/15	100/100	55/3	70	170	—/150
H65	105	320/700	91/450	70/450	12/13.5	100/100	48/4	—	—	—
H63	100	300/630	110/500	70/420	—	—	49/4	66	140	56/140
H62	100	330/600	150/200	80/420	12/15.4	100/300	49/3	66	140	56/164
H60	98	390/500	—	80/—	12/18.2	100/500	44/10	62	140	—/163

注：表中斜杠（/）前数据为软态，后数据为硬态。

表4.4-13　普通黄铜的高温力学性能

合金牌号	温度/℃	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度HB	冲击韧度/J·cm^{-2}
H90	100	270	48	53	180
	200	260	48	50	160
	300	260	50	48	150
	500	240	—	46	90
H80	100	310	52	53	160
	200	300	51	51	151
	300	280	42	48	135
	500	270	39	44	50
H60	100	390	57	56	70
	200	320	55	56	66
	300	210	48	43	40
	500	160	—	23	30

表4.4-14　普通黄铜的低温力学性能

合金牌号	状态	温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%
H70	加工退火的	20	358	198	49	77
		-10	372	201	49	77
		-40	383	189	58	77
		-80	400	192	60	79
		-120	429	196	55	78
		-180	515	189	75	73
H70（Cu71.6%）	加工退火的	18	291	67	82.6	76.4
		0	300	69	79.7	78.7
		-30	303	76	75.9	79.7
		-80	341	85	74.5	80.0
H68（Cu67.0%）	550℃退火	20	400	275	50.4	72
		-78	429	306	49.8	76.6
		-183	535	400	50.8	70.7

续表 4.4-14

合金牌号	状态	温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%
H68 (Cu67.0%)	40%冷加工	20	601	592	6.3	66.5
		-78	648	643	7.8	71.5
		-183	720	712	10.1	66.5
H60 (Cu60.6%)	25%冷加工	20	558	399	19.8	65.5
		-78	581	420	21.0	67.7
		-183	689	561	24.4	64.1
H60 (Cu60.6%)	550℃退火	20	384	140	51.3	75.5
		-78	429	158	53.0	74.6
		-183	531	200	55.3	71.0

表 4.4-15 普通黄铜的相对于 HPb62-3 的可切削性

合金牌号	H96	H90	H85	H80	H70	H68	H65	H63	H62	H60
切削性/%	20	20	30	30	30	30	30	40	40	45

2 铅黄铜

铅几乎不固溶于铜-锌合金中，而存在于固溶体的晶界处。经过压力加工，铅以游离的质点分布在固溶体内。由于游离的铅质点具有润滑和减摩的特性，因此，铅黄铜都具有极高的切削性能，切屑易碎，工件表面光洁，适宜于自动高速车床加工零件。但铅含量超过3%以后，不但不会进一步改善合金的切削性能，反而由于铅质点性软、熔点低，会大大降低合金的综合性能。

在单相 α 黄铜中有不溶铅质点而不宜热轧，但双相黄铜依靠相变重结晶（α→β)，可使铅分布于晶粒内部而不是在边界上。因而在热变形时的重熔已不再那么危险。

铅对人体有害。铅黄铜在熔铸和切削加工中，铅蒸气和粉尘对环境和人身的危害越来越引起人们的重视。人们纷纷致力于寻找替代品，含碲无铅易切削黄铜已经投入商业应用。

2.1 合金牌号、特点和应用

铅黄铜的合金牌号、特点和应用见表 4.4-16。

表 4.4-16 铅黄铜的牌号、特点和应用

合金牌号	主要特点	应用
HPb89-2	热成形性差但冷加工性良好，钎焊性优，切削性优	电气接插件、建筑金属构件、酸洗框、机械零件等
HPb66-05	热成形性差，但冷加工性优，钎焊性优良可气焊和电阻焊，切屑性优	管道工程用弯头、存水管、泵用管等
HPb63-3	热挤压性良，其他热成形性差，冷加工性中，钎焊性优良，切削性优，强度中等	钟表材料、管件、螺钉等
HPb63-0.1	冷热加工性能均不良，切削性能一般	
HPb62-0.8	热成形性中等，冷加工性良，钎焊性优，切削性优，强度高	结构件
HPb62-3	热成形性中等，冷加工性能差，钎焊性优，切削性优，强度高	螺钉、销子垫片、管嘴、结构件、齿轮、管件等
HPb62-2	热加工性中等，冷加工性尚可，钎焊性优，切削性优	条纹板、钟表零件、管件等
HPb61-1	热成形性中等，冷加工性差，钎焊性优良，切削性好	小五金、销子、螺钉、管件等
HPb60-2	热成形性中等，冷加工性差，钎焊性好，强度高	
HPb59-3	冷热加工性能良，钎焊性好，切削性优	
HPb59-1	冷热加工性能良，钎焊性好，切削性优	各种销钉、螺钉、垫片、小五金、管件、轴承保持器等

2.2 化学成分

铅黄铜的化学成分见表 4.4-17。

表 4.4-17 铅黄铜的化学成分 %

合金牌号	Cu	Fe	Pb	Ni	Zn	杂质总和
HPb89-2	87.5~90.5	0.10	1.3~2.5	0.7	余量	—
HPb66-0.5	65.0~68.0	0.07	0.25~0.7	—	余量	—
HPb63-3	62.0~65.0	0.10	2.4~3.0	0.5	余量	0.75
HPb63-0.1	61.5~63.5	0.15	0.05~0.3	0.5	余量	0.50
HPb62-0.8	60.0~63.0	0.20	0.5~1.2	0.5	余量	0.75
HPb62-3	60.0~63.0	0.35	2.5~3.7	—	余量	—
HPb62-2	60.0~63.0	0.15	1.5~2.5	—	余量	—
HPb61-1	60.0~63.0	0.15	0.6~1.2	—	余量	—
HPb60-2	58.0~61.0	0.30	1.5~2.5	—	余量	
HPb59-3	57.5~59.5	0.50	2.0~3.0	0.5	余量	1.2
HPb59-1	57.0~60.0	0.50	0.8~1.9	1.0	余量	1.0

2.3 物理及化学性能

铅黄铜的物理性能见表 4.4-18。

表 4.4-18 铅黄铜的物理性能

合金牌号	液相线温度/℃	固相线温度/℃	密度/g·cm^{-3}	线胀系数/10^{-6}K^{-1}	导热率/W·(m·k)$^{-1}$	电导率/%IACS	电阻率/μΩ·m
HPb89-2	1 040	1 010	8.85	18.4	190	42	0.041
HPb66-0.5	940	905	8.50	20.2	115	26	0.066
HPb63-3	906	886	8.50	20.5	117	26	0.066
HPb63-0.1							
HPb62-0.8							
HPb62-3	900	885	8.50	20.5	115	26	0.066
HPb62-2	905	885	8.50	20.5	115	26	0.066
HPb61-1	900	885	8.41	20.8	120	27	0.064
HPb60-2	895	880	8.44	20.7	120	27	0.064
HPb59-3							
HPb59-1	900	885	8.50	20.6	105		0.068

2.4 热加工与热处理规范

铅黄铜的典型热加工和热处理规范举例见表 4.4-19 和表 4.4-20。

表 4.4-19 典型铅黄铜热加工规范举例

合金牌号	铸锭规格/mm	产品	出炉温度/℃	加热时间/h
HPb59-1	160×620×1500	板	680~720	2.5~3.0
	ϕ195×（400~600）	棒	580~630	1.0~2.0
HPb63~3	ϕ195×（400~500）	棒	620~670	1.0~2.0

表 4.4-20 典型铅黄铜中间退火规范举例

合金牌号	产品名称	规格/mm	退火温度/℃	加热时间
HPb59-1	带卷	≥0.5	515~525	2 卷/h
	带卷	0.3~0.5	480~500	1 盘/h
	棒	ϕ5~100	650~680	0.2~2.5 h
HPb63-3	棒	ϕ5~100	500~550	2.0~2.5 h

2.5 力学性能

典型铅黄铜的力学性能见表 4.4-21~表 4.4-25。

表 4.4-21 HPb89-2 的典型力学性能

状态	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 /%	硬度	抗剪强度 /MPa
退火的	255	86	45	55HRF	165
1/2 硬	360	310	18	58HRB	205

表 4.4-22 HPb66-0.5 的典型力学性能

状态/晶粒度	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 /%	硬度
退火 0.025 mm	325	105	60	64HRF
退火 0.050 mm	360	135	50	75HRF
拉制的	450	345	32	100HRF
拉制硬态的	515	415	7	85HRB

注：数据来自 ϕ25 mm×1.05 mm 管材。

表 4.4-23 HPb63-3 的典型力学性能

状态	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 /%	硬度 HRB
退火的	350	9	45	40
硬的	580	45	5	86

表 4.4-24 HPb62-3 的典型力学性能

状态	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 /%	硬度
退火的	340	125	53	68HRB
1/2 硬	400	310	25	28HRF

表 4.4-25 HPb59-1 的典型力学性能

状态	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 /%	硬度 HRB
退火的	420	148	45	44
1/4 硬	620	420	5	80

2.6 工艺性能

铅黄铜的工艺性能见表 4.4-26。

表 4.4-26 铅黄铜的工艺性能

合金牌号	切削性[①]/%	热轧	热挤	热冲	热锻	热弯	冷加工	可焊性	再结晶	退火	热加工
HPb89-2	80	×	○	×	×	—	○	⊙		425~650	
HPb66-0.5	60	×	○	×	○	—	⊙	⊙	290	425~650	
HPb63-3	100	○	○	○	×	○	×	○		425~600	680~800
HPb63-0.5	40	×	○	×	○	×	○	○		420~600	
HPb62-3	100	○	○	○	○	○	×	○		425~600	700~800
HPb62-2	90	○	○	○	⊙	○	×	⊙		425~600	700~800
HPb61-1	70	○	⊙	△	⊙	○	—			425~600	625~800
HPb60-2	80	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	×	○		425~600	650~850
HPb59-1	80	○	⊙	△		○	—	×	360	425~600	650~850

注：⊙优；○好；△尚可；×不可。

① 相当于 HPb63-3 合金。

3 锡黄铜

锡在饱和的 α 固溶体中的溶解度很小，但当锌含量增加出现 β 相时，锡的溶解度会增加。少量锡能提高黄铜的强度和硬度，但超过 1.5%后反而会降低黄铜的性能。锡的另一个重要作用是抑制黄铜脱锌，提高黄铜的耐蚀性能。锡黄铜在海水中的耐蚀性很好，故有“海军黄铜”之称。向 HSn70-1 中添加 0.02%~0.05%的砷和/或 0.01%的硼可进一步提高锡黄铜的耐蚀性。

3.1 合金牌号、特点和应用

锡黄铜的牌号、特点和用途见表 4.4-27。

表 4.4-27 锡黄铜的合金牌号、特点和应用

合金牌号	主要特点	应用举例
HSn90-1	导电性良好且耐蚀减摩，热、冷加工性良好	端子、仪表夹、弹簧垫圈、车用弹簧套管等
HSn70-1	耐蚀性好，冷热加工性优良，可热挤，强度高	船舶和热电厂用高强耐蚀冷凝器管冷凝器管板、船舶零件、阀杆等
HSn62-1	耐蚀性好，热加工性优，强度高，切削性优良	船用结构焊条、零件等
HSn60-1	热加工性好，冷加工性差，耐蚀性良	

3.2 化学成分

锡黄铜的化学成分见表4.4-28。

3.3 物理及化学性能

锡黄铜的物理性能见表4.4-29，化学性能见表4.4-5。

表4.4-28 锡黄铜的化学成分 %

合金牌号	Cu	Sn	Fe	Pb	Ni	As	Zn	杂质总和
HSn90-1	88.0~91.0	0.25~0.75	0.10	0.03	0.5	—	余量	0.2
HSn70-1	69.0~71.0	0.8~1.3	0.10	0.05	0.5	0.02~0.06	余量	0.3
HSn62-1	61.0~63.0	0.7~1.1	0.10	0.10	0.5	—	余量	0.3
HSn60-1	59.0~61.0	1.0~1.5	0.10	0.30	0.5	—	余量	1.0

表4.4-29 锡黄铜的物理性能

合金牌号	液相线温度/℃	固相线温度/℃	密度/g·cm^{-3}	线胀系数/10^{-6}K^{-1}	热导率/W·(m·K)$^{-1}$	电阻率/μΩ·m	电导率/%IACS	弹性模量/GPa
HSn90-1	1 016	906	8.80	18.4	126	0.054	41	105
HSn70-1	936	891	8.58	20.2	110	0.069	25	110
HSn62-1	907	886	8.45	19.3	116	0.066.3	26	100
HSn60-1	901	885	8.45	21.2	116	0.066.3	26	100

3.4 热加工和热处理规范

锡黄铜的热加工和热处理规范见表4.4-30。

3.5 力学性能

锡黄铜的典型力学性能见表4.4-31。

表4.4-30 锡黄铜热加工和热处理规范实例

合金牌号	热加工工艺				退火工艺		
	推荐热加工加热温度/℃	加热时间/h	环形炉1区加热温度/℃	环形炉2区加热温度/℃	推荐退火温度/℃	退火温度/℃	退火时间/h
HSn90-1	830~890	—	—	—	510~670	—	—
HSn70-1	650~800	1.5~2.0	800~880	800~850	425~600	470~500	1.5
HSn62-1	650~825	1.5~2.0	850~880	800~850	425~600	580~610	1.5
HSn60-1	650~750	—	—	—	425~600	—	—

表4.4-31 锡黄铜的典型力学性能

合金牌号	弹性极限/MPa	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%	硬度HRB
HSn90-1	70/380	280/520	85/450	40/4	55	13/82
HSn70-1	85/450	350/580	110/500	62/10	70	16/95
HSn62-1	110/480	380/700	150/550	40/4	52	50/95
HSn60-1	100/360	380/560	130/420	40/12	46	50/80

注：表中斜杠（/）前的数字为600℃退火的，后的数字为加工率50%的。

3.6 工艺性能

锡黄铜加工艺性能见表4.4-32。

表4.4-32 锡黄铜的工艺性能

合金牌号	热轧	热挤	热冲	热锻	热弯	冷加工	切削性/%	焊接性	耐蚀性
HSn90-1	△	○	×	△	○	⊙	20	—	○
HSn70-1	△	○	×	×	○	⊙	30	—	⊙
HSn62-1	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	○	40	⊙	○
HSn60-1	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	○	40	○	○

注：⊙优；○好；△尚可；×不可。

4 铁黄铜

铁在黄铜中的固溶度极低，超过其溶解度的铁以富铁相（γFe）粒子存在，常作为“人工晶核”，既能细化铸造组织，又能抑制黄铜再结晶时的晶粒长大，获得细晶组织，从而大大提高黄铜的力学性能和工艺性能。铁与锰、锡、铝、镍等元素配合使用，可以使黄铜具有更高的强度和硬度，并可改善其在大气和海水中的耐蚀性。

黄铜中的铁和硅会形成高硬度（950HV）的硅化铁粒子，恶化切削性能。

黄铜的铁含量一般不超过1.5%，否则会造成富铁相偏析，破坏黄铜的耐蚀性，而且会影响电镀层表面质量。

4.1 合金牌号、特点和应用

我国的铁黄铜仅有两个牌号：HFe59-1-1和HFe58-1-1。但实际上HFe58-1-1在市场上极少见。HFe59-1-1有很高的强度，耐磨和耐蚀性良好。除热冲压外，其他热加工性能优良。可承受冷加工和切屑加工。用于制造在摩擦和海水环境中工作的零件，如垫圈、封套等。

4.2 化学成分

铁黄铜的化学成分见表4.4-33。

表 4.4-33 铁黄铜的化学成分 %

合金牌号	Cu	Fe	Pb	Al	Mn	Sn	Ni	Zn	杂质总和
HFe59-1-1	57.0~60.0	0.6~1.2	0.20	0.1~0.5	0.5~0.8	0.3~0.7	0.5	余量	0.3
HFe58-1-1	56.0~58.0	0.7~1.6	0.7~1.3	—	—	—	0.5	余量	0.3

4.3 物理和化学性能

铁黄铜的物理性能见表 4.4-34，化学性能见表 4.4-5。

4.4 热加工和热处理规范

铁黄铜的热加工和热处理规范见表 4.4-35。

表 4.4-34 HFe59-1-1 的物理性能

液相线温度 /℃	固相线温度 /℃	密度 /g·cm^{-3}	线胀系数 /10^{-6}K^{-1}	热导率 /W·(m·K)$^{-1}$	电阻率 /μΩ·m	电导率 /%IACS	弹性模量 /GPa
901	886	8.50	22	20.1	0.093	18.5	106

表 4.4-35 HFe59-1-1 的加热和退火规范实例

加热方式	加热温度/℃	保温时间或推料周期
热轧前加热	720~800	3.0~3.5 h
热挤前加热	710~760	1.5~2.5 h
中间退火	540~560（1.5 mm 板）	4 卷/h
	600~650（ϕ40 mm 以下棒）	1.0~1.2 h
成品退火	460（0.5 mm 板、S）	2 卷/h
	460~500（≤ϕ40mm 棒、Y）	1.0~1.2 h

4.5 力学性能

铁黄铜的力学性能见表 4.4-36。

表 4.4-36 HFe59-1-1 的典型力学性能

抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 /%	断面收缩率 /%	硬度 HRB	冲击韧度 /J·cm^{-2}
450/600	170/—	40/6	45	80/160	120

4.6 工艺性能

铁黄铜的工艺性能见表 4.4-37。

表 4.4-37 HFe59-1-1 的工艺性能

热轧	热挤	热锻	热冲	热弯	冷加工	切削性 /%	焊接性	耐蚀性	耐磨性
⊙	⊙	⊙	○	⊙	○	25	○	○	○

注：⊙优；○好。

铁黄铜 HFe59-1-1 在海水中的腐蚀速度为 0.22 mg/cm^2（24 h 的重量损失）。它在无润滑条件的摩擦因数为 0.012。

5 铝黄铜

和其他合金元素相比，铝能最显著地提高黄铜的强度和耐蚀性能。在黄铜中加入铝，会使 α 相区明显地移向铜角。当铝含量高时会出现硬而脆的 γ 相，提高合金的强度和硬度。同时大幅度降低其塑性。在铝黄铜中，铝的表面离子化倾向比锌的大，优先形成致密而坚硬的氧化铝膜，可以防止合金的进一步氧化。向铝黄铜中加入 Sn、Sb、Bi、Te、Si、Ni 等元素都可以进一步提高其耐蚀性。工业上变形铝黄铜的铝含量一般不超过 4%。

5.1 合金牌号、特点和应用

铝黄铜的合金牌号、特点和应用见表 4.4-38。

表 4.4-38 铝黄铜的合金牌号、特点和应用

合金牌号	主要特点	应用举例
HAl77-2	耐海水腐蚀，有足够的力学性能，可热挤压，冷加工性能良好	舰船用冷凝器管等
HAl67-2.5		内陆热电厂用冷凝器管等
HAl66-6-3-2 HAl61-4-3-1	有较高的强度和耐磨性，耐冲击性良好。可热挤压，冷加工性较好	汽车同步器齿环等

5.2 化学成分

铝黄铜的化学成分见表 4.4-39。

5.3 物理和化学性能

铝黄铜的物理性能见表 4.4-40，化学性能见表 4.4-5。

表 4.4-39 铝黄铜的化学成分 %

合金牌号	Cu	Al	Fe	Pb	Mn	Ni	Si	As	Zn	杂质总和
HAl77-2	76.0~79.0	1.8~2.5	0.06	0.07	—	—	—	0.02~0.06	余量	—
HAl67-2.5	66.0~68.0	2.0~3.0	0.6	0.5	—	0.5	—	—	余量	1.5
HAl66-6-3-2	64.0~68.0	6.0~7.0	2.0~4.0	0.5	1.5~2.5	0.5	—	—	余量	1.5
HAl61-4-3-1	59.0~62.0	3.5~4.5	0.3~1.3	—	—	2.5~4.0	0.5~1.5	Co0.5~1.0	余量	1.0
HAl60-1-1	58.0~61.0	0.70~1.50	0.70~1.50	0.40	0.1~0.6	0.5	—	—	余量	0.7
HAl59-3-2	57.0~60.0	2.5~3.5	0.50	0.10	—	2.0~3.0	—	—	余量	0.7

表 4.4-40 铝黄铜的物理性能

合金牌号	液相线温度/℃	固相线温度/℃	密度/g·cm^{-3}	线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$	热导率/W·(m·K)$^{-1}$	电阻率/μΩ·m	弹性模量/GPa
HAl77-2	971	931	8.60	18.5	208.4	0.075	102
HAl67-2.5	971	932	8.50	18.5	—	0.077	—
HAl66-6-3-2	900	—	8.50	19.8	208.4	—	—
HAl61-4-3-1	921	903	7.909	19.0	—	0.090	—
Hal60-1-1	905	—	8.20	21.6	315.2	0.090	105
HAl59-3-2	957	893	8.40	19.0	350.1	0.079	100

5.4 热加工和热处理规范

铝黄铜的热加工和热处理规范举例见表 4.4-41。

表 4.4-41 铝黄铜的热加工和热处理规范实例

合金牌号	加热温度/℃	加热时间/h	退火温度/℃	退火时间/h
HAl77-2	740~780	1.5~2.5	650~680/600~620	1.2~1.4
HAl67-2.5	760~800	1.5~2.5		
HAl66-6-3-2	680~730	1.0~2.0		
HAl61-4-3-1	680~730	1.0~2.0	500~540/450~480	1.5~2.0
HAl60-1-1	600~650	1.0~2.0		
HAl59-3-2	660~710	1.0~2.0		

注：斜杠（/）前的数字是中间退火温度，后面为成品退火温度。

5.5 力学性能

铝黄铜的力学性能见表 4.4-42。

表 4.4-42 铝黄铜的典型力学性能

合金牌号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度HRB	断面收缩率/%	冲击韧度/J·cm^{-2}
HAl77-2	360/600	80/540	50/10	65/170	58	—
HAl66-6-3-2	740①	400①	7①	—	—	—
HAl61-4-3-1	745②	—	6.5②	230②	—	—
HAl60-1-1	450/760	200	50/9	80/170	30	—
HAl59-3-2①	380/650	304	45/12	75/155	20	41

注：斜杠（/）前面的数据是软态的，后面的数据是硬态的。
① 铸态的。
② 挤制的。

5.6 工艺性能

铝黄铜的工艺特性和使用特性见表 4.4-43。

表 4.4-43 铝黄铜的工艺及使用特性

合金牌号	热轧	热挤	热锻	热冲	热弯	冷加工	切削性	焊接性	耐蚀性
HAl77-2	△	○	○	△	○	○	○	○	※
HAl67-2.5	△	○	○	△	○	○	○	○	※
HAl66-6-3-2	×	○	○	△	○	○	○	△	○
HAl61-4-3-1	×	○	○	△	○	○	○	○	△
HAl60-1-1	×	○	○	△	△	—	○	○	△
HAl59-3-2	×	○	○	△	△	△	△	○	△

注：△为尚可，○为好，※为优，×为差。

6 锰黄铜

对黄铜而言，锰的加入对其 α 相区的影响极其微弱。因此，锰基本上不改变黄铜的组织，但却可以通过固溶强化使黄铜的强度和硬度提高，并大幅度提升其对海水、氯化物和过热蒸汽的耐蚀性。锰黄铜有相当好的冷、热加工性能，被广泛使用于舰船和海洋工程。也作为耐磨材料用于高压泵摩擦副和汽车同步齿环。

6.1 合金牌号、特点和应用

部分锰黄铜的合金牌号、特点和应用见表 4.4-44，其中 HMn58-2 参见第 6 章 2.2 节。

6.2 化学成分

锰黄铜的化学成分见表 4.4-45。

表 4.4-44 部分锰黄铜的牌号、特点及应用

合金牌号	主要特点	应用举例
HMn62-3-3-0.7	强度高、热塑性好、耐磨性好、耐蚀、易切削加工	管、棒材，汽车同步器齿环
HMn57-3-1	有很高的强度和硬度，耐磨、耐蚀，加工性良好	管、棒材，结构件、摩擦副

表 4.4-45 锰黄铜的化学成分 %

合金	Cu	Mn	Fe	Pb	Al	Sn	Si	Ni	Zn	杂质总和
HMn62-3-3-0.7	60.0~63.0	2.7~3.7	0.11	0.05	2.4~3.4	0.1	0.5~1.5	0.5	余量	1.2
HMn57-3-1	55.0~58.5	2.5~3.5	1.0	0.2	0.5~1.5	—	—	0.5		1.3
HMn55-3-1	53.0~58.0	3.0~4.0	0.5~1.5	0.5	—	—	—	0.5		1.5

6.3 物理和化学性能

锰黄铜的物理性能见表 4.4-46，化学性能见表 4.4-5。

6.4 热加工和热处理规范

锰黄铜的热加工和热处理规范实例见表 4.4-47。

表 4.4-46 锰黄铜的物理性能

合金牌号	液相线温度 /℃	固相线温度 /℃	密度 /$g\cdot cm^{-3}$	线胀系数 /$10^{-6}K^{-1}$	热导率 /W·$(m\cdot K)^{-1}$	电阻率 /μΩ·m	电导率 /%IASC	弹性模量 /GPa
HMn57-3-1	870	—	8.10	21.0	67	0.121	—	104
HMn62-3-3-0.7	901	855	8.02	19.3	—	0.113	—	—

表 4.4-47 锰黄铜的热加工和热处理规范实例

合金牌号	热轧/挤加热温度 /℃	热轧/挤加热时间 /h	中间退火温度 /℃	软态退火温度 /℃	半硬态退火温度 /℃	退火时间 /h
HMn57-3-1 HMn62-3-3-0.7	挤 580～630 轧 600～650 620～680	1～2 1～2 1～2（挤）	600～650 600～650 —	— — —	500～550 — —	1.5 1.5 —

6.5 力学性能

锰黄铜的力学性能见表 4.4-48。

表 4.4-48 锰黄铜的典型力学性能

合金牌号	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 /%	断面收缩率/%	硬度 HRB
HMn62-3-3-0.7	600～700	—	10～20	—	170～200
HMn57-3-1	550/700	200/—	35/5	—	115/175

注：表中斜杠（/）前数据为软态，后数据为硬态。

6.6 工艺性能

锰黄铜的工艺性能和使用性能见表 4.4-49。

表 4.4-49 锰黄铜的工艺性能和使用性能

合金牌号	热轧	热挤	热锻	热冲	热弯	冷加工	切削性	耐磨性	耐蚀性	焊接性
HMn57-3-1	△	○	○	△	○	△	△	△	○	△
HMn62-3-3-0.7	△	○	○	○	○	△	○	☆	○	△

注：☆为优，○为好，△尚可。

7 硅黄铜

硅的锌当量系数高达 10。在黄铜中加入硅会显著地缩小 α 相区。增加硅含量到 4%会出现新的具有密排六方结构的 k 相，它在高温下有足够的塑性，在 545℃时通过共析分解转变为 $\alpha+\beta$（$\kappa\rightarrow\alpha+\beta$）。硅黄铜的硅含量通常在 4%以内，常用的牌号为 HSi80－3，其组织为 $\alpha+\gamma$。

硅黄铜的高低温力学性能令人满意，在大气和海水条件下耐蚀性强，可以焊接。因此，硅黄铜被用做船舶零件、蒸汽管和水道管件。硅黄铜的铸造和压力加工性能良好，但 Al、As、Sb、P、Pb 等都是硅黄铜中有害杂质，应当加以控制。

7.1 牌号和化学成分

硅黄铜 HSi80-3 的化学成分见表 4.4-50。

表 4.4-50 硅黄铜 HSi80-3 的化学成分 %

合金牌号	Cu	Si	Fe	Pb	Ni	Zn	杂质总和
HSi80-3	79.0～81.0	2.5～4.0	0.6	0.1	0.5	余量	1.5

7.2 其他性能

硅黄铜的物理性能、典型力学性能及工艺性能见表 4.4-51。其化学性能见表 4.4-5。

表 4.4-51 HSi80-3 的物理、力学和工艺性能

名　称	数值
液相线温度/℃	900
密度/$g\cdot cm^{-3}$	8.6
线胀系数 $\alpha/10^{-6}K^{-1}$	17.0
热导率/W·$(m\cdot K)^{-1}$	175.1
电阻率/μΩ·m	0.20
弹性模量/MPa	98 000
抗拉强度/MPa	300/600
伸长率/%	58/4（软/硬）
硬度 HRB	90/110（软/硬）
硬度 HV	60/180（软/硬）
冲击韧度/$J\cdot cm^{-2}$	120～160
铸造温度/℃	960～1 000
热加工温度/℃	750～850
切削性（与 HPb63-3 比）/%	15

7.3 热加工规范

硅黄铜 HSi80-3 的热加工和热处理实例见表 4.4-52。

表 4.4-52 HSi80-3 热加工加热和退火工艺规范举例

品种	热轧或挤加热温度/时间	退火温度/时间
板	Ⅰ区 780～800℃/3～3.5 h Ⅱ区 720～800℃/3～3.5 h	— —
棒	740～790℃/1～2 h	600～650℃/2 h
管	780～830℃/1～2 h	600～650℃/2 h

8 镍黄铜

镍和许多合金元素（如铝、锰、锡和硅等）不同，能明显地扩大 α 相区域的范围，因而能用加镍的办法使某些两相黄铜转变为晶粒细小的单相黄铜，从而改善黄铜的工艺性能和力学性能。

典型的镍黄铜是 HNi65-5，它具有很高的力学性能、耐蚀性和工艺性能，能极好地在冷、热状态下进行压力加工。但某些杂质如铅、锑、铋等会严重影响其热加工性，应严格控制，铅应小于 0.01%，锑和铋应小于 0.005%。镍黄铜

HNi65-5可以加工成板、带、管、棒、线材，用于制造低压压力计管、纸浆铜网、船用冷凝器管和其他工业部门的零件。

HNi65-5的化学成分见表4.4-53，物理、力学和工艺性能见表4.4-54，化学性能见表4.4-5。

表4.4-53 镍黄铜HNi65-5的化学成分 %

Cu	Ni	Zn	Pb	Fe	P	杂质总和
64.0~67.0	5.0~6.5	余量	0.03	0.15	0.01	0.3

表4.4-54 HNi65-5的物理、力学和工艺性能

名称	数值
液相线温度/℃	960
密度/g·cm^{-3}	8.65
电阻率/μΩ·m	0.146
线胀系数/10^{-6}K^{-1}	18.2
热导率/W·(m·K)$^{-1}$	58.4
弹性模量/GPa	112
抗拉强度/MPa	380/800（软/硬）
屈服强度/MPa	140（软的）
伸长率/%	65/1.5（软/硬）
硬度HBR	64/110（软/硬）
铸造温度/℃	1 100~1 150
热轧温度/℃	820~870
挤压温度/℃	750~800
退火温度/℃	600~650
低温退火温度/℃	300~400
切削性能（与HPb63-3比）/%	30

编写：马可定（洛阳铜加工集团有限责任公司）

第5章　高弹性铜合金

1　铍青铜加工材

铍青铜是一种特殊青铜，是典型的沉淀强化型高传导、高弹性铜合金。这种合金有着良好的综合性能，它除具有高的强度、弹性、硬度、耐磨性和抗疲劳等优点外，还具有优良的导电性、导热性、耐腐蚀性、耐高低温、无磁、冲击时不产生火花等特性。经固溶处理（或低温退火）后的铍青铜，具有非常好的加工性能，可采用各种成形方式加工成复杂的形状。铍青铜的弹性极限值虽然没有钢的弹性极限值高，但它的弹性模量（E）几乎比钢小1倍（110～130 GPa），在弹性变形量（σ_e/E）相同的情况下，与钢材相比，铍青铜弹性元件中的应力也相应地约小1倍。用铍青铜制造的弹性元件，弹性滞后、弹性后效以及其他弹性不完整性也较小。

由于铍青铜具有仪表小型化必不可少的独特性能，同时铍青铜的质量，首先是它的弹性极限及松弛稳定性很高，因此，虽然它的价格偏高，用量却没有减少。铍青铜产品的60%用于制造弹性元件，例如膜片、膜盒、波纹管、发电机刷弹簧、继电器弹簧、弹簧接触片、断路器弹簧、航空仪表上用的各类弹簧。此外，铍青铜还用于精密仪器制造，各种零件如轴承、齿轮、特殊的无火花工具的制造等，是各工业领域必不可少、不可替代的材料。

铍青铜加工材的牌号列于表4.5-1。

1.1　铍青铜加工材的化学成分

铍青铜加工材的化学成分列于表4.5-2。

表4.5-1　铍青铜加工材的牌号

国别	GB（中国）	DIN（德国）	ГОСТ（俄罗斯）	ASTM（美国）	BS（英国）	NF（法国）	JIS（日本）	ISO
高强度铍青铜加工材	QBe2	CuBe2	БРБ2	C17200	CB101	—	C1720	CuBe2CoNi
	QBe1.9	—	БРБНТ1.9	C17200	—	CuBe1.9	C1720	—
	QBe1.7	CuBe1.7/2.1245	БРБНТ1.7	C17000	—	CuBe1.7	C1700	—
	QBe1.9～0.1	—	БРБНТ1.9 МГ	—	—	—	—	—
高传导铍青铜加工材	QBe0.6～2.5	CuCo2Be/2.1285	—	C17500	—	—	C1750	—
	QBe0.4～1.8	—	—	C17510	—	—	C1751	—
	QBe0.3～1.5	—	—	C17600	—	—	C1760	—

表4.5-2　铍青铜加工材的化学成分（质量分数）（摘自GB/T 5231—2001）　%

类型	牌号	Al	Be	Si	Ni	Fe	Pb	Ti	Mg	Co	Ag	Cu	杂质总和
高强度铍青铜	QB2	0.15	1.80～2.1	0.15	0.2～0.5	0.15	0.005	—	—	—	—	余量	0.5
	QBe1.9	0.15	1.85～2.1	0.15	0.2～0.4	0.15	0.005	0.1～0.25	—	—	—	余量	0.5
	QBe1.9-0.1	0.15	1.85～2.1	0.15	0.2～0.4	0.15	0.005	0.1～0.25	0.07～0.13	—	—	余量	0.5
	QBe1.7	0.15	1.6～1.85	0.15	0.2～0.4	0.15	0.005	0.1～0.25	—	—	—	余量	0.5
高传导铍青铜	QBe0.6-2.5	0.20	0.4～0.7	0.20	—	0.10	—	—	—	2.4～2.7	—	余量	—
	QBe0.4-1.8	0.20	0.20～0.6	0.20	1.4～2.2	0.10	—	—	—	0.30	—	余量	—
	QBe0.3-1.5	0.20	0.25～0.5	0.20	—	0.10	—	—	—	1.4～1.7	0.9～1.1	余量	—

1.2　物理与化学性能

（1）铍青铜加工材的物理性能

1）热性能见表4.5-3。

2）密度　QBe2、Be1.9、QBe1.7、QBe1.9-0.1合金的密度为8.25 g·cm^{-3}；QBe0.6-2.5、QBe0.6-1.8、QBe0.3-1.5合金的密度为8.75 g·cm^{-3}。

3）电学性能见表4.5-4。

表4.5-3　铍青铜加工材的热性能

性　能	熔化温度范围 T/℃	比热容（室温）c/J·(kg·K)$^{-1}$	线胀系数 α/10^{-6}K^{-1}	室温热导率 λ/W·(m·K)$^{-1}$
QBe2	856～956	418.7	16.6（20～100℃） 17.0（20～200℃）	83.7（固溶处理状态） 104.7（时效处理状态）
QBe1.9，QBe1.7，QBe1.9-0.1	865～980	418.7		
QBe0.6-2.5，QBe0.6-1.8	1 000～1 070	420		
QBe0.3-1.5	1 000～1 110	420	17.6（20～200℃）	201（时效处理状态）

表 4.5-4 铍青铜加工材的电学性能

合金	材料状态①			电阻率 $\rho/\mu\Omega\cdot m$	电导率 q/%IACS
	状态	时效温度/℃	时效时间/min		
QBe2	C	—	—	0.086～0.082	19.9～20.9
	CY（40）	—	—	0.089	19.2
	CY（61）	—	—	0.096～0.094	18.0～18.4
	CS	300	60	0.082	20.9
			120	0.074	23.2
			180	0.073	23.6
			240	0.071	24.2
			360	0.068	25.2
	CS	360	10	0.088	19.6
			20	0.087	19.8
			30	0.082	21.1
			60	0.081	21.2
			90	0.066	26.0
			120	0.058	29.4
			180	0.053	32.5
QBe1.9	C	—	—	0.106	15～19
		300	180	0.087	—
	CY_2（ε＝20%）	—	—	0.114	—
		300	180	0.083	—
	CY（ε＝50%）	—	—	0.114	15～19
		300	180	0.080	—
	C（780℃退火）	—	—	0.060	22～28②
		300	180	0.055	
	退火后 ε＝20%	—	—	0.064	
		300	180	0.057	
	退火后 ε＝50%	—	—	0.068	
		300	180	0.058	
	C	370	20	0.070	—
	CY_2（ε＝20%）			0.068	—
	CY（ε＝50%）			0.064	—
QBe1.7	C，CY	—	—	—	15～19
	CS	320	100	0.06～0.078	26.85
QBe1.9-0.1	C	—	—	0.106	15～19
	CY	—	—	0.114	15～19
	CYS	300～370	20～180	0.06～0.08	22～28
QBe0.6-2.5	C，CY	—	—	—	20～30
	CS	480	120～180	0.036	45～60
	CYS	480	120～180	0.031	48～60
QBe0.4-1.8	C，CY	—	—	—	20～30
	CS	480	120～180	0.034	45～60
	CYS	480	120～180	0.029	48～60
QBe0.3-1.5	C，CY	—	—	—	20～30
	CS	480	180	0.034	50～60
	CYS	480	180	0.029	50～60

① 材料状态：C 固溶处理状态；CY 固溶处理后冷轧；CY_4 固溶处理后冷轧加工率 10%；CY_2 固溶处理后冷轧加工率 20%；CS 淬火（软时效）；CYS 淬火＋冷变形＋时效（硬时效）。

② 该数据在 CS 及 CYS 态热处理 320℃（2～3 h）下获得。

4）磁性能 铍青铜加工材无磁性。

（2）化学性能

铍青铜加工材的抗氧化性优于紫铜。合金在大气、淡水和海水中有很高的化学稳定性，晶间腐蚀倾向性小并能耐冲击腐蚀，在稀盐酸、乙酸和磷酸等介质中也有良好的耐蚀性，但在潮湿氨、硝酸、铬酸盐溶液中腐蚀速度较快。

1.3 铍青铜加工材的热加工与热处理规范

铍青铜加工材的热加工与热处理规范列于表4.5-5及表4.5-6。

1.4 铍青铜加工材的力学性能与工艺性能

1）铍青铜典型的弹性性能

① 弹性模量见表4.5-7～表4.5-9。

表4.5-5 铍青铜加工材的的热加工规范

热加工规范	高强度铍青铜加工材	高传导铍青铜加工材
加热温度/℃	788～802	899～927
始加工温度/℃	788～802	899～927
终加工温度/℃	780～650	899～650
冷却	水冷	水冷

表4.5-6 铍青铜加工材的热处理规范

种类	固溶处理					时效处理		
	牌 号	加热温度/℃	材料厚度/mm（截面厚度，较大工件）	保温时间/min（每25 mm厚保温60 min）	冷却	加热温度/℃	保温时间/min	冷却
强度铍青铜加工材	QBe2	780～800	<0.13	2～6	急冷	315	120～180	空冷或随炉冷
	QBe1.9	770～790	0.13～0.25	3～9	急冷			
	QBe1.7	770～790	0.25～0.76	6～15	急冷			
	QBe1.9－0.1	770～790	0.76～2.3	10～30	急冷			
高传导铍青铜加工材	QBe 0.6-2.5 QBe 0.4-1.8 QBe 0.3-1.5	899～927	—	—	急冷	480	120～180	空冷或随炉冷

表4.5-7 铍青铜QBe1.9的弹性模量

ε/%	时效制度		E_D/GPa	ε/%	时效制度		E_D/GPa
	温度/℃	时间/h			温度/℃	时间/h	
10	300	0.5	129.5	10	350	0.25	131.4
		1	131.4			0.5	132.4
		2	132.4			1	132.4
		4	133.4			2	133.4
30	300	0.5	131.4	30	350	0.25	131.4
		1	134.4			0.5	132.4
		2	134.4			1	134.4
		4	134.4			2	132.4
50	300	0.5	132.4	50	350	0.25	133.4
		1	134.4			0.5	134.4
		2	135.3			1	133.4
		4	135.3			2	133.4

表4.5-8 铍青铜QBe2不同状态的弹性模量

状态	780～790℃固溶	320℃，2 h时效	350℃，1 h时效
E/GPa	122.6	135.8	135.3

表4.5-9 铍青铜QBe2的低温弹性模量

品种	状态 ε/%	在下列温度（℃）时的 E/GPa						
		25	－60	－78	－130	－183	－196	－235
棒材	M	—	126.9	—	145.3	168.9	—	—
	Y_2（22）	120.7	—	122.7	—	—	129.6	134.7

② 规定非比例伸长应力见表4.5-10和表4.5-11。

2）QBe2铍青铜加工材的力学性能与工艺性能见表4.5-12和图4.5-1～图4.5-6。

表4.5-10 铍青铜QBe1.9的规定非比例伸长应力

原始状态（ε/%）	时效制度		$\sigma_{P0.001}$	$\sigma_{P0.002}$	$\sigma_{P0.005}$	原始状态（ε/%）	时效制度		$\sigma_{P0.001}$	$\sigma_{P0.002}$	$\sigma_{P0.005}$
	温度/℃	时间/h	/MPa				温度/℃	时间/h	/MPa		
C	—	—	100	130	165	Y_4（10）	350	1	920	950	1 010
Y_4（10）	—	—	365	410	540				900	930	1 000
Y_2（30）	—	—	450	540	610	Y_2（30）	300	0.5	910	950	1 020
Y（50）	—	—	480	540	630			1	950	1 000	1 050
Y_4（10）	300	0.5	785	835	900			2	990	1 030	1 100
		1	855	910	980			4	990	1 030	1 100
		2	890	950	1 000		350	0.25	940	980	1 020
		4	880	930	980			0.5	970	1 020	1 080
	350	0.25	920	950	990			1	930	960	1 030
		0.5	950	970	1 020			2	885	930	980

表 4.5-11　铍青铜 QBe2 的规定非比例伸长应力

时效温度（时间 2 h）/℃	$\sigma_{p0.001}$/MPa	$\sigma_{p0.001}$/MPa
300	820	930
320	435 ~ 725	525 ~ 775
340	425 ~ 540	495 ~ 605

表 4.5-12　QBe2 铍青铜加工材的力学性能与工艺性能

种类	材料状态	δ 或 D	σ_b/MPa	δ_{10}/% ≥	硬度
板带材	C	厚度 0.25 ~ 6.0 mm	390 ~ 590	30	≤140HV
	CY_4		520 ~ 630	10	120 ~ 220HV
	CY_2		570 ~ 695	6	140 ~ 240HV
	CY		≥635	2.5	≥170HV
	CS		≥1 125	2.0	≥320HV
	CY_4S		≥1 135	2.0	320 ~ 420HV
	CY_2S		≥1 145	1.5	340 ~ 440HV
	CYS		≥1 175	1.5	≥360HV
棒材	M	5 ~ 40	400	30	≥100HB
	R	20 ~ 120	400	20	
	D	35 ~ 100	500 ~ 660	8	≥78HRB
	Y_2	5 ~ 40	500 ~ 660	8	≥78HRB
	Y	5 ~ 10	660 ~ 900	2	≥150HB
		> 10 ~ 25	620 ~ 860	2	
		> 25	590 ~ 830	2	
	TF00（时效：320℃ ±5℃，3 h）	5 ~ 40	1 000 ~ 1 380	2	30 ~ 40HRC
	TH04（时效：320℃ ±5℃，3 h）	5 ~ 10	1 200 ~ 1 500	1	35 ~ 45HRC
		> 10 ~ 25①	1 150 ~ 1 450①	1①	35 ~ 44HRC①
		> 25	1 100 ~ 1 400	1	34 ~ 44HRC
线材	材料状态	硬化调质 σ_b/MPa			
		硬化调质前		硬化调质后	
	M	380 ~ 580		> 1 050	
	Y_2	550 ~ 800		> 1 200	
	Y	> 80		> 1 300	

注：1. M 软态，R 挤制，D 锻造。
2. TF00 软时效态。
3. TH04 硬时效态。
4. 板带材执行 YS/T 323—2002 标准。
5. 棒材执行 YS/T 334—1995 标准。
6. 线材执行 GB/T 3134—1982 标准。
① 时效：320℃ ±5℃，2 h。

3）QBe1.9 铍青铜加工材的力学性能与工艺性能见表 4.5-13 和图 4.5-7 ~ 图 4.5-9。

4）QBe1.9 铍青铜加工材的力学性能与工艺性能见表 4.5-14 和图 4.5-10 ~ 图 4.5-13。

5）QBe1.9-0.1 铍青铜加工材的力学性能与工艺性能见表 4.5-15 和图 4.5-13 ~ 图 4.5-15。

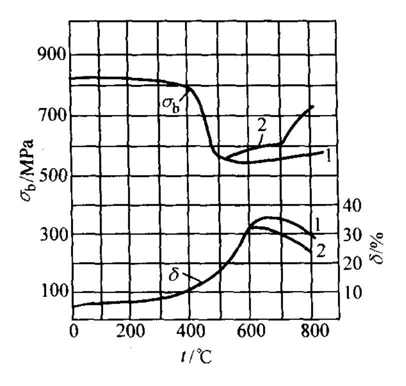


图 4.5-1　QBe2 的力学性能与退火温度的关系
1—水淬；2—慢冷

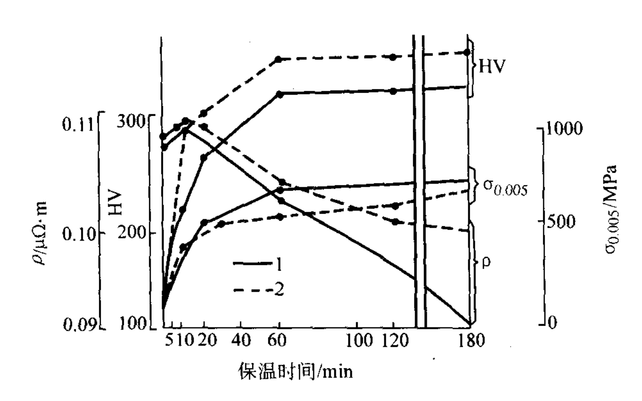


图 4.5-2　QBe2 的电阻系数、硬度、弹性极限与 300℃保温时间的关系

6）其他铍青铜加工材的力学性能与工艺性能见表 4.5-16。

1.5　铍青铜加工材选用实例

（1）高强度铍青铜

1）QBe2 为最普遍指定使用的铍青铜加工材，就其时效硬化而言，该合金达到了商用铜基合金加工材的最高强度及硬度。其最高抗拉强度可超过 1 400 MPa，硬度约为洛氏硬度 45HRC。同时在充分时效的状况下，其电导率最低为 22%IACS。合金对升温过程中的应力松弛也具有异常的抵抗力。该合金比传统铜的密度低，但其弹性模量比特定的铜合金高 10% ~ 20%。强度、弹性使该合金成为各工业应用领域，高可靠性仪表小型化所必不可少的独特材料。

当部件经受剧烈成形过程又要求高强度、高滞弹性、抗疲劳和抗蠕变时，该合金应用于各种弹簧，金属软管、夹子、垫圈、扣环。要求高强度或高抗磨，同时又要求良好的导电或低磁性时，该合金应用于航空航天导航仪表，无火花工具，撞针、衬套、阀泵、轴、机械部件等。要求高强度、良好的耐蚀性和导电性，该合金被应用于电机弹簧片，接触电桥、螺栓、螺钉等。使用时的注意事项：由于此合金含铍，所以在熔化、研磨、机加工、焊接或其他制造及检验产生粉尘烟雾时，应配备适当的排风，以免危害健康。

2）QBe1.9 合金在化学成分上类似于合金 QBe2，不同之处是在此基础上添加了少量的 Ti（0.1% ~ 0.25%），这样能细化铸态、热加工和固溶处理的晶粒，阻碍不连续析出，从而改善合金组织的均匀性，提高疲劳强度，使时效处理后合金具有良好的弹性稳定性和小的弹性滞后。应用同 QBe2。

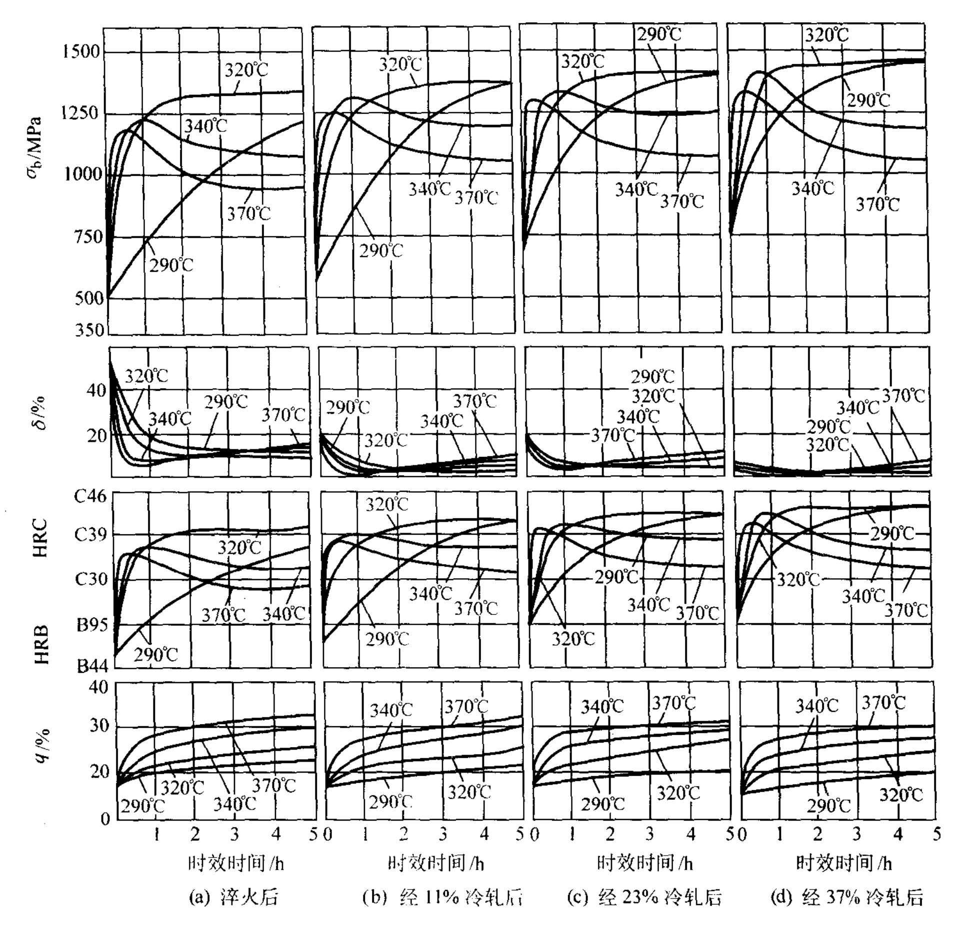


图 4.5-3 QBe2(含 1.9% Be, 0.2% Ni)在时效时性能的变化

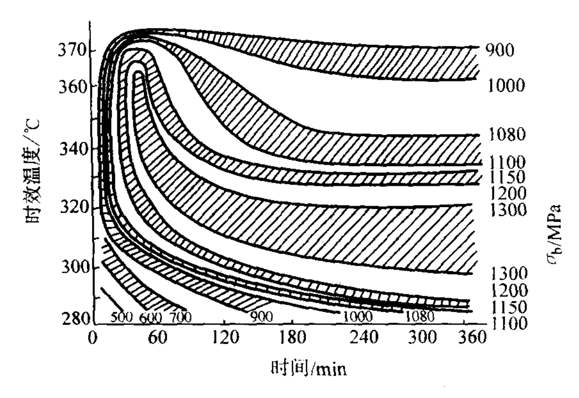


图 4.5-4 时效温度和时间对 QBe2 抗拉强度的影响

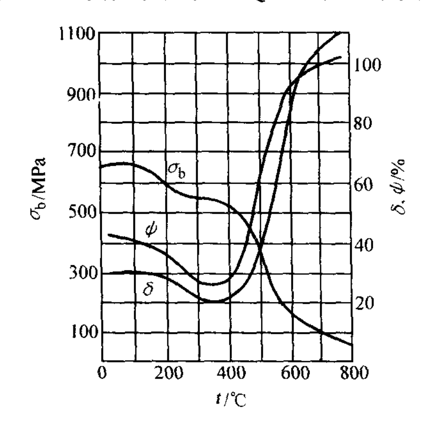


图 4.5-5 QBe2 的高温短时力学性能

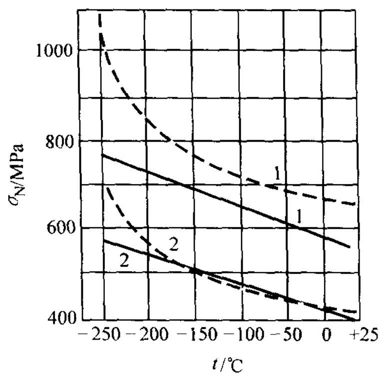


图 4.5-6 QBe2 在对称循环弯曲时的低温疲劳强度

---厚 0.5 mm 带材,经 320℃时效 3 h;

——厚 1.98 mm 板材,冷轧和经 320℃时效 2 h;

1—循环周次 10^5;2—循环周次 10^6

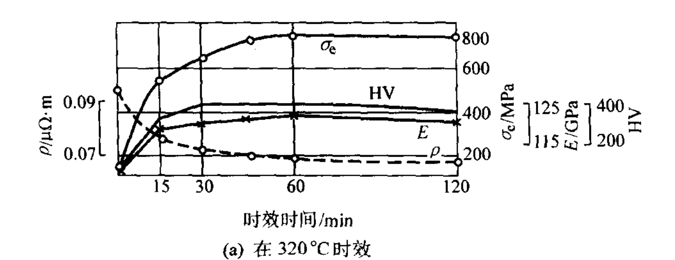
表 4.5-13 QBe1.9 铍青铜加工材的力学性能与工艺性能

种类	材料状态	δ 或 D/mm	σ_b/MPa	δ_{10}/% ≥	硬度
板带材	C	厚度 0.25 ~ 6.0	390 ~ 590	30	≤140HV
	CY_4		520 ~ 630	10	120 ~ 220HV
	CY_2		570 ~ 695	6	140 ~ 240HV
	CY		≥635	2.5	≥170HV
	CS		≥1 125	2.0	≥320HV
	CY_4S		≥1 135	2.0	320 ~ 420HV
	CY_2S		≥1 145	1.5	340 ~ 440HV
	CYS		≥1 175	1.5	≥370HV

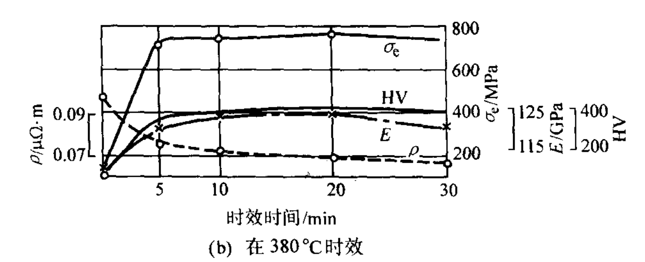
续表 4.5-13

种类	材料状态	δ 或 D/mm	σ_b/MPa	δ_{10}/% ≥	硬度
棒材	M	5 ~ 40	400	30	≥100HB
	R	20 ~ 120	400	20	—
	D	35 ~ 100	500 ~ 660	8	≥78HRB
	Y_2	5 ~ 40	500 ~ 660	8	≥78HRB
	Y	5 ~ 10	660 ~ 900	2	≥150HB
		> 10 ~ 25	620 ~ 860	2	
		> 25	590 ~ 830	2	
	TF00（时效：320℃ ±5℃，3 h）	5 ~ 40	1 000 ~ 1 380	2	30 ~ 40HRC
	TH04（时效：320℃ ±5℃，3 h）	5 ~ 10	1 200 ~ 1 500	1	35 ~ 45HRC
		> 10 ~ 25①	1 150 ~ 1 450①	1①	35 ~ 44HRC①
		> 25	1 100 ~ 1 400	1	34 ~ 44HRC

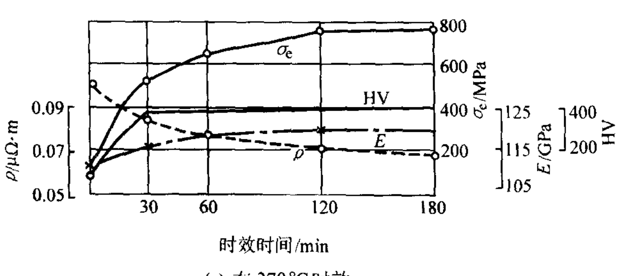
① 时效：320℃ ± 5℃，2 h。



(a) 在 320℃时效



(b) 在 380℃时效



(c) 在 370℃时效

图 4.5-7 790℃淬火的 QBe1.9 于不同温度时效时的性能变化

3）QBe1.9-0.1 合金化学成分是在 QBe1.9 的基础上添加了 0.1%左右的 Mg。Mg 的加入，可抑制固溶温度升高时的晶粒长大性能。含 Mg 在 0.1%时，力学性能最好，其疲劳强度、循环松弛稳定性及静应力松弛也都有所提高。应用同 QBe2。

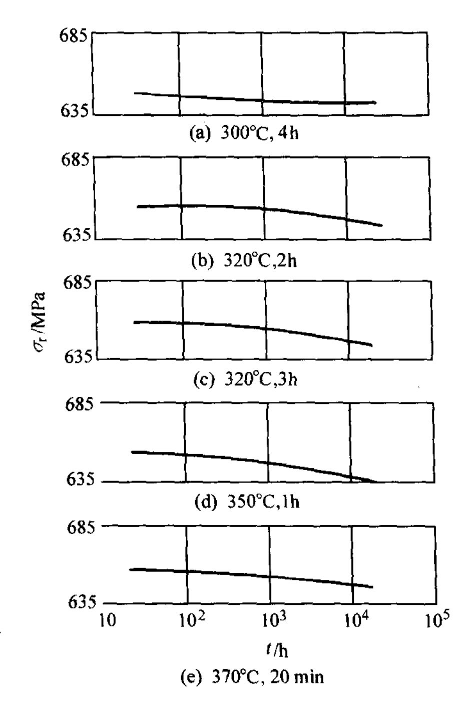


图 4.5-8 时效后的 QBe1.9 在 20℃时的应力松弛

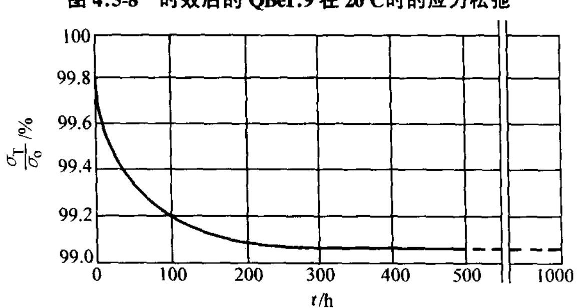
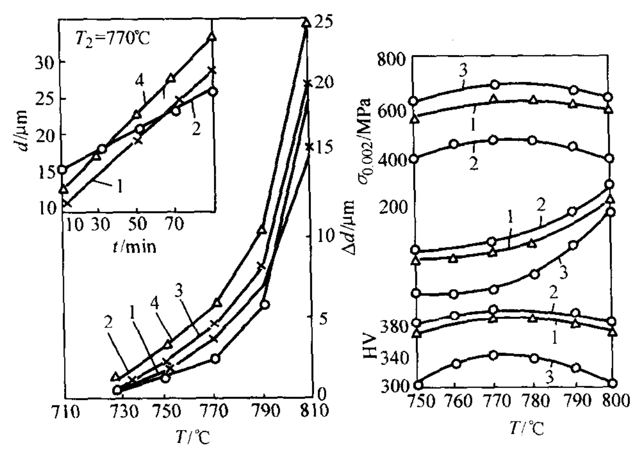


图 4.5-9 静载荷为 785 MPa 时 QBe1.9（340℃）的应力松弛度

表 4.5-14 QBe1.7 铍青铜加工材的力学性能

种类	材料状态	δ 或 D/mm	σ_b/MPa	δ_{10}/% ≥	硬度
板带材	CY_2	厚度 0.25 ~ 6.0	570 ~ 695	6	140 ~ 240HV
	CY		≥590	2.5	≥150HV
	CY_2S		≥1 030	2.0	340 ~ 440HV
	CYS		≥1 080	2.0	≥340HV
棒材	M	5 ~ 40	400	30	≥100HV
	R	20 ~ 120	400	20	—
	D	35 ~ 100	500 ~ 660	8	≥78HRB
	Y_2	5 ~ 40	500 ~ 660	8	≥78HRB
	Y	5 ~ 10	660 ~ 900	2	≥150HB
		> 10 ~ 25	620 ~ 860	2	
		> 25	590 ~ 830	2	
	TF00（时效：320℃ ±5℃，3 h）	5 ~ 40	1 000 ~ 1 380	2	30 ~ 40HRC
	TH04（时效：320℃ ±5℃，3 h）	5 ~ 10	1 200 ~ 1 500	1	35 ~ 45HRC
		> 10 ~ 25①	1 150 ~ 1 450①	1①	35 ~ 44HRC①
		> 25	1 100 ~ 1 400	1	34 ~ 44HRC

① 时效：320℃ ± 5℃，2 h。



(a) α 固溶体晶粒度 d 与固溶温度及保温时间的关系　(b) 铍青铜物理力学性能与固溶温度的关系(320℃,4h 时效处理)

图 4.5-10 固溶处理对铍青铜组织和性能的影响

1—QBe2；2—QBe1.9；3—QBe1.7；4—QBe2.5

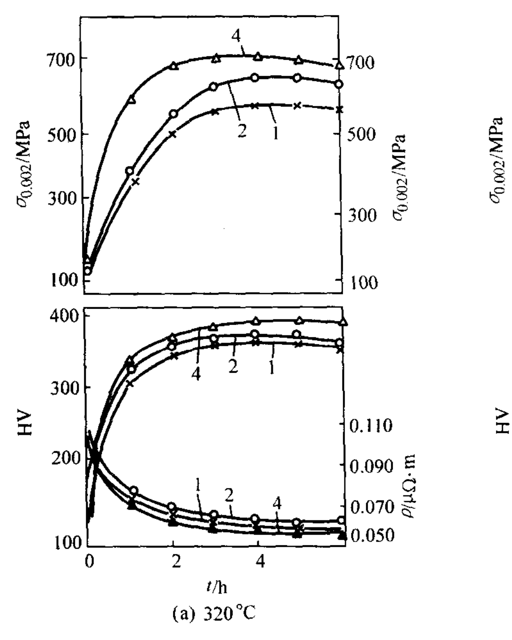
4) QBe1.7-0.1 合金铍含量控制在 1.6% ~ 1.85% 并含有 0.1% ~ 0.25% 的 Ti。Ti 除了能细化铸态、热加工和固溶处理后的晶粒，阻碍不连续析出外，由于 Be 含量较低还能减少合金经固溶处理后残存的脆硬 β 相的数量，从而改善了合金组织的均匀性。与其他高强度铍青铜相比力学性能略低。可应用于对力学性能要求略低的仪器、仪表等的应用领域。

(2) 高传导铍青铜

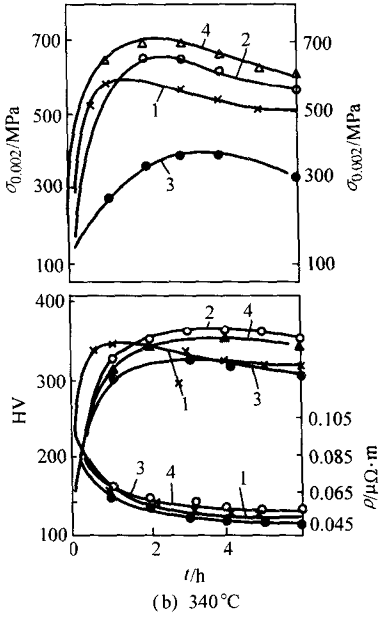
1) QBe0.6-2.5 合金与高强度铍青铜相比，具有中等屈服强度（时效后为 980 MPa），其电导率为纯铜的 45% ~ 65%，这一性质使其在需要散热及载流的场合得到应用。应用包括带、线材（熔断器、紧固件、弹簧、开关部件、电接插件、导线）和棒、板材（电阻点焊电极头、缝焊电极盘、模铸塞棒头、塑料模具、工作场合）。

2) QBe0.4-1.8 合金添加元素为 Be 及 Ni，而 QBe0.6-2.5 合金添加元素为 Be 及 Co，合金的导热性在铍铜合金中最高，并具有中等屈服强度。另外，添加 Ni 可降低合金的成本。应用同 QBe0.6-2.5 合金。

3) QBe0.3-1.5 合金除添加 Be 及 Co 外，还含有 0.90% ~ 1.10% 的 Ag，这就大大提高了合金的导电性，使合金除具有其他低铍合金的共同性能外，还具有极好的导电性，可应用于对电导率要求特殊的工作场合。可被特殊设计用做电阻焊机电极，用于点焊、缝焊、闪光焊、凸焊、导电体、夹子等。



(a) 320℃



(b) 340℃

图 4.5-11 工业铍青铜物理力学性能与时效温度、时效时间的关系

1—QBe2；2—QBe1.9；3—QBe1.7；4—QBe2.5

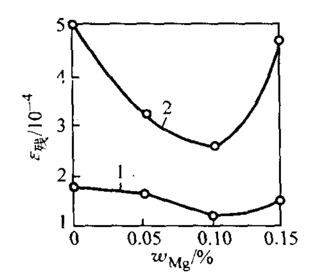


图 4.5-12 铍青铜 QBe1.9 中含镁量对循环松弛 $\varepsilon_{残}$（循环次数 10^4）变形量的影响应力值

1—440 MPa；2—638 MPa

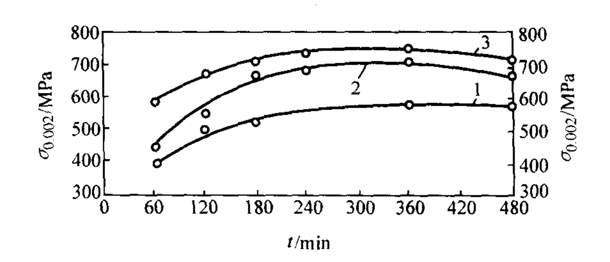


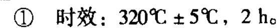
图 4.5-13 铍青铜 QBe1.9 弹性极限与 320℃时效保温时间的关系

1—QBe1.9；2—QBe1.9 + 0.05%Mg；

3—QBe1.9 + 0.1%Mg

表 4.5-15 QBe1.9-0.1 铍青铜加工材的力学性能与工艺性能

种类	材料状态	δ 或 D/mm	σ_b/MPa	δ_{10}/% ≥	硬度≥
棒材	M	5 ~ 40	400	30	100HB
	R	20 ~ 120	400	20	
	D	35 ~ 100	500 ~ 660	8	78HRB
	Y_2	5 ~ 40	500 ~ 660	8	78HRB
	Y	5 ~ 10	660 ~ 900	2	150HB
		> 10 ~ 25	620 ~ 860	2	
		> 25	620 ~ 830	2	
	TF00（时效：320℃ ±5℃，3 h）	5 ~ 40	1 000 ~ 1 380	2	30 ~ 40HRC
	TH04（时效：320℃ ±5℃，3 h）	5 ~ 10	1 200 ~ 1 500	1	35 ~ 45HRC
		> 10 ~ 25[①]	1 150 ~ 1 450[①]	1[①]	35 ~ 44HRC[①]
		> 25	1 100 ~ 1 400	1	34 ~ 44HRC


① 时效：320℃ ±5℃，2 h。

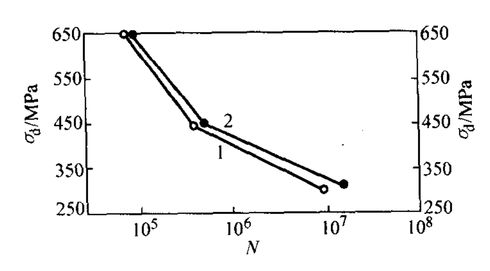
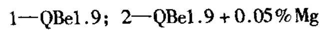


图 4.5-14 铍青铜在固溶处理及 320℃、6 h 时效后的疲劳强度


1—QBe1.9；2—QBe1.9 + 0.05% Mg

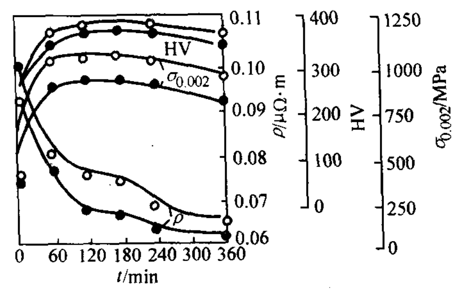


图 4.5-15 320℃时效时间对铍青铜性能的影响

1—QBe1.9；2—QBe1.9 + 0.05% Mg

（原始状态：固溶处理 + 30%冷变形 ●—●1 ○—○2）

表 4.5-16 部分铍青铜加工材的力学性能与工艺性能

牌号	种类	材料状态	δ 或 D/mm	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	硬度	
							HRB	表面
QBe0.6-2.5	板带材	C	—	240 ~ 390	140 ~ 220	20 ~ 40	20 ~ 45	30T28-45
		CY	—	490 ~ 600	380 ~ 570	2 ~ 10	78 ~ 88	30T69-75
		CS（时效：480℃，2 ~ 3 h）	—	700 ~ 920	560 ~ 710	10 ~ 25	92 ~ 100	30T77-82
		CYS（时效：480℃，2 ~ 3 h）	—	770 ~ 950	660 ~ 850	8 ~ 20	95 ~ 102	30T79-83
	棒材	M	5 ~ 40	≥240	—	≥20[①]	≤50	—
		Y		≥450	—	> 2[①]	60	
		TF00（时效：480℃ ±5℃，3 h）	5 ~ 40	690 ~ 895	—	≥6[①]	92 ~ 100	—
		TH04（时效：480℃ ±5℃，3 h）	5 ~ 40	760 ~ 965	—	≥3[①]	95 ~ 102	—
QBe0.4-1.8	板带材	C	—	240 ~ 290	140 ~ 220	20 ~ 40	20 ~ 45	30T28-45
		CY	—	490 ~ 600	380 ~ 570	2 ~ 10	78 ~ 88	30T69-75
		CS（时效：480℃，2 ~ 3 h）	—	700 ~ 920	560 ~ 710	10 ~ 25	92 ~ 100	30T77-82
		CYS（时效：480℃，2 ~ 3 h）	—	770 ~ 950	660 ~ 850	8 ~ 20	95 ~ 102	30T79-83
	棒材	M	5 ~ 40	≥240	—	≥20[①]	≤50	—
		Y		≥450	—	≥2[①]	60	—
		TF00（时效：480℃ ±5℃，3 h）	5 ~ 40	690 ~ 895	—	≥6[①]	92 ~ 100	—
		TH04（时效：480℃ ±5℃，3 h）		760 ~ 965	—	≥3[①]	95 ~ 102	—

续表 4.5-16

牌号	种类	材料状态	δ 或 D/mm	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	硬度	
							HRB	表面
QBe0.3-1.5	棒材	M	5~40	≥240	—	≥20①	≤50	—
		Y		≥450	—	≥2①	60	—
		TF00（时效：480℃±5℃，3 h）	5~40	690~895	—	≥6①	92~100	—
		TH04（时效：480℃±5℃，2 h）		760~965	—	≥3①	95~102	—

① δ_5 数据。

2 铸造铍青铜

铸造铍青铜按铍含量可分为高铍青铜和低铍青铜两类，低铍青铜亦称低合金化的高铜合金。铸造高铍青铜中含有1.7%~2.8%的Be和少量的Co或Ni、Si；铸造低铍青铜中仅有0.3%~0.8%的Be和2%~6%Co或Ni，为了提高热强性，有的合金中还添加少量的Cr。尽管合金中的铍在熔炼、铸造及热加工热处理工艺过程中会产生有害人体健康的不利因素，但只要做好防护工作，对其不利因素是可以预防的。

基于铍青铜优异的特性，铸造铍青铜合金主要应用于要求强度高、耐腐蚀、耐磨损、高导电和高导热的零部件，如继电器开关、连铸机的结晶器、水冷模、压铸机的活塞头、船舶和化工结构件，如螺旋浆、叶片、泵零件等。用于高强度耐磨零件，如塑料成形模具、压铸机零件、凸轮、衬套、轴承、阀、安全工具。

铸造铍青铜的牌号见表4.5-17。

表 4.5-17 铸造铍青铜的牌号

类别	GB（中国）	DIN（德国）	ASTM（美国）	JIS（日本）
高强度铸造铍青铜	ZCuBe2	—	C82500	20C
	ZCuBe2.4	—	—	275
	ZCuBeAl8-Fe1Co1	—	—	275
	ZCuBeAl8-Fe1Co1	CuBe1.7/2.1245	C82600	—
高传导铸造铍青铜	ZCuBe0.6-Co2.5	—	C82000	10C
	ZCuBe0.6-Ni2	—	C82200	10C

2.1 铸造铍青铜的化学成分

铸造铍青铜的化学成分列于表4.5-18。

2.2 铸造铍青铜的物理性能

铸造铍青铜的物理性能列于表4.5-19。

表 4.5-18 铸造铍青铜的化学成分 %

牌 号	Be	Co	Ni	Si	Cu	Ni	Fe	Al	Sn	Pb	Zn	Cr	Si	Sb
ZCuBe2	1.90~2.15	0.35~0.70①	—	0.20~0.35	>96.5	0.20	0.25	0.15	0.10	0.02	0.10	0.10	—	
ZCuBe2.4	2.25~2.45	0.35~0.75	—	0.20~0.35	>95.2	0.20	0.25	0.15	0.10	0.02	0.10	0.10	—	—
ZCuBeFe1Al8Co1	0.7~1.2	0.7~1.2	—	—	其余	—	0.4	7.0~8.0	、-	0.05	—	—	0.1	0.05
ZCuBe0.6Co2.5	0.45~0.8	2.4~2.10	—	—	>95	0.20	0.10	0.10	0.10	0.02	0.10	0.10	0.15	
ZCuBe0.6Ni2	0.35~0.8	—	1.0~2.0	—	>96.5	—	0.10	0.10	0.10	0.02	0.10	0.10	0.15	

① 包括Co+Ni。

表 4.5-19 铸造铍青铜的物理性能

牌号	液相点 θ/℃	固相点 θ/℃	密度 ρ/g·cm^{-3}	比热容 c/J·(kg·K)$^{-1}$	热导率 λ/W·(m·K)$^{-1}$	电阻率 ρ/μΩ·m	线胀系数 α/10^{-6}K^{-1}	电导率 q/%IACS
ZCuBe2	982	857	8.26	418	97	0.086 2①	16.92（20~200℃）	20①
ZCuBe2.4	954	857	8.06	418	94	0.091	17（20~200℃）	19①
ZCuBeFe1Al8Co1	1 040	1 010	7.6	—	79.5（150℃） 100.5（40℃）	0.138	15.35（0~100℃） 17.8（200~300℃）	13
ZCuBe0.6Co2.5	1 088	971	8.62	418	215	0.035 9	17.8（20~300℃）	48①
ZCuBe0.6Ni2	1 060	1 035	8.75	—	277	0.086 2 0.043 1①	17.0（20~310℃）	20~40①

① 完全热处理。

2.3 铸造铍青铜的耐蚀性能（表4.5-20）

表4.5-20 铸造铍青铜的耐蚀性能

完全耐蚀性	充分耐蚀性	不充分耐蚀性
醋酸0.1%（室温）	醋酸2.5%~10%（室温）	铝（熔融）
明矾	湿溴（室温）	氢氧化铵
大气（田园）	氯（湿室温）	Sb-Pb共融物（熔融）
大气（工厂地带）	氟（湿室温）	镉（熔融）
盐水	盐酸（0%~5%室温）	铬酸
氯化钙	水银（93~371℃）	氟（湿高温）
四氯化碳	磷酸3%~95%（室温~100℃）	盐酸10%（60℃）
柠檬酸	海水（60℃）	硫化氢（湿）
氟利昂	食盐3%+氯化铜	铅（熔融）
汽油	苛性钠（室温）1%~10%	硝酸
硫化氢（干）	硫酸0%~10%（室温）	硫酸5%+重铬酸钾3%
水银（室温~93℃）	锌（熔融）	铊（熔融）
磷（66℃）		氨（湿）
海水（室温）		铋（熔融）
钠（熔融600℃）		溴（湿、高温）
水蒸气		氯（湿、高温）
丹宁酸		氯化铁
酒精类		镓（熔融）
干燥氨		盐酸>5%（室温）
海岸大气		铟（熔融）
硼酸		锂（熔融）
干燥溴		硫酸10%（60℃）
碳酸气体（干、湿）		锡（熔融）
氯化物（干）		
干燥氟		
淡水		
碳化氢类		
酮类		
草酸		
钾（熔融600℃）		
食盐		
Na-K合金（熔融600℃）		
亚硫酸气体（干燥）		
三氯乙烯		

注：耐蚀性是按以下标准来区分：完全耐蚀 < 0.025 4 mm/a；充分耐蚀0.025 4 ~ 0.254 mm/a；不充分耐蚀 > 0.254 mm/a。

2.4 铸造铍青铜的热处理规范（表4.5-21）

表4.5-21 铸造铍青铜的热处理规范

序号	牌号	热处理			
1	ZCuBe2	固溶处理			
		项目	加热温度/℃	保温时间	冷却
		铸件	775~785	每10 mm厚、保温0.5 h	水淬快速
		时效处理			
		项目	加热温度/℃	保温时间	冷却
		铸件标准时效处理	320~340	2~4 h	空冷
		铸件低温时效处理	316	2 h	空冷
		铸件高温时效处理	399	2 h	空冷
2	ZCuBe2.4	固溶处理			
		项目	加热温度/℃	保温时间	冷却
		铸件	775~785	每10 mm厚保温0.5 h	水淬快速

续表 4.5-21

序号	牌号	热处理			
2	ZCuBe2.45	时效处理			
		项目	加热温度/℃	保温时间	冷却
		铸件标准时效处理	320 ~ 340	2 ~ 4 h	空冷
		铸件低温时效处理	288	1 h	空冷
		铸件高温时效处理	427	3 h	空冷
3	ZCuBe0.6-Co2.5	固溶处理			
		项目	加热温度/℃	保温时间	冷却
		铸件	900 ~ 925	每 10 mm 厚、保温 1 h	水淬快速
		时效处理			
		项目	加热温度/℃	保温时间	冷却
		铸件标准时效处理	460 ~ 480	3 ~ 5 h	空冷
		铸件低温时效处理	399	2.5 h	空冷
		铸件高温时效处理	538	8 h	空冷
4	ZCuBe0.6Ni2	固溶处理			
		项目	加热温度/℃	保温时间	冷却
		铸件	900 ~ 925	每 10 mm 厚保温 1 h	水淬快速
		时效处理			
		项目	加热温度/℃	保温时间	冷却
		铸件标准时效处理	460 ~ 480	3 ~ 5 h	空冷
		铸件低温时效处理	399	2.5 h	空冷
		铸件高温时效处理	538	8 h	空冷

2.5 铸造铍青铜的力学性能（表 4.5-22 ~ 表 4.5-24）

表 4.5-22 铸造铍青铜的力学性能

序号	牌号	状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	室温硬度		
						HB	HRB	HRC
1	ZCuBe0.6-Co2.5	铸态	345	140	20	88	55	—
		铸态 + 时效	450	225	12	—	40	—
		固溶处理	325	105	25	—	40	—
		固溶处理 + 时效	670	515	8	191	95	—
2	ZCuBe0.6-Ni2	铸态	310 ~ 370	85 ~ 175	15 ~ 25	93	45 ~ 60	—
		铸态 + 时效	380 ~ 515	170 ~ 345	10 ~ 15	122.5	65 ~ 75	—
		固溶处理	275 ~ 345	70 ~ 105	20 ~ 30	—	35 ~ 45	—
		固溶处理 + 时效	655 ~ 760	485 ~ 550	3 ~ 15	211	92 ~ 100	—
3	ZCuBe2	铸态	515 ~ 585	275 ~ 345	15 ~ 30	137.5	80 ~ 85	—
		铸态 + 时效	690 ~ 725	485 ~ 575	10 ~ 20	235	20 ~ 24	—
4	ZCuBe2.4	铸态	550 ~ 585	310 ~ 345	15 ~ 25	152	81 ~ 86	—
		铸态 + 时效	655 ~ 725	415 ~ 450	5 ~ 15	245	—	20 ~ 25
		固溶处理	515 ~ 550	205 ~ 240	15 ~ 30	128	70 ~ 76	—
		固溶处理 + 时效	1 170 ~ 1 240	1 105 ~ 1 170	1 ~ 3	397	—	40 ~ 43
5	ZCuBeAl8-Fe1Co1	铸态	645 ~ 735	295 ~ 355	20 ~ 30	153.5 ~ 182.5	—	—

表 4.5-23 铸造铍青铜（ZCuBe0.6Co2.5 合金）的高温硬度

试验温度/℃	20	93	204	316	426	538	649
硬度 HRA	62	61	60	59	56	47	25

表 4.5-24 铸造铍青铜的弹性性能

序号	牌号	弹性模量 E/GPa	切变模量 G/GPa	泊松比
1	ZCuBe2	127.5①	50①	0.30①
2	ZCuBe2.4	131①	50①	0.30①
3	ZCuBeFe1Al8Co1	120	46	0.34
4	ZCuBe0.6Co2.5	117①	44①	0.33①
5	ZCuBe0.6Ni2	124①	50①	—

① 完全热处理。

2.6 铸造铍青铜的工艺性能

ZCuBe0.6Co2.5、ZCuBe0.6Ni2、ZCuBe2、ZCuBe2.4 和 ZCuBeAl8Fe1-Co1 合金的工艺概述如下。

1) 铸造性能 有较好的铸造工艺性能，高的流动性，易于充型，能得到尺寸准确的铸件。适合于砂型和精密铸造，也可以进行金属型、离心和压力铸造。

2) 焊接性能 有良好的焊接性能，能够进行锡焊、银焊、铜焊和各种形式的电阻焊。在一定程度上也能进行熔焊，包括气体保护钨极，金属极和碳极电弧焊，但不推荐氧乙炔焊。

3) 切削性能 铸造铍青铜的切削性能类似于铝青铜。切削加工率为 30%（以铅黄铜 HPb63-3 的切削加工率为 100%计）。当使用高速钢刀具时，工件外圆最大转速为 15～30 m/min，进给量为 0.38～0.76 mm/r。

4) 表面处理工艺 可进行电镀 Cd、Zn、Sn、Cu、Cr、Ni、Ag、Rh 及 Au 等，并可着色。

此外，铸造铍青铜部分工艺性能列于表 4.5-25。

表 4.5-25 铸造铍青铜的工艺性能

序号	牌号	特 点	熔化温度/℃	浇注温度/℃	
				小件	大件
1	ZCuBe0.6-Co2.5 ZCuBe0.6Ni2	有比较好的铸造工艺性，低的造渣性，中等吸气，收缩和高的流动性，尺寸敏感性小	971～1 088 1 035～1 060	1 150～1 200 1 170～1 200	1 120～1 150 1 140～1 170
2	ZCuBe2 ZCuBe2.4	有比较好的铸造工艺性、造渣性、吸气和收缩性、尺寸敏感性中等	857～982 857～954	1 060～1 120 1 040～1 080	1 010～1 030 1 010～1 030
3	ZCuBeAl8-Fe1Co1	有良好的铸造工艺性，中等的吸气、收缩和流动性、造渣性较强	1 010～1 040	1 080～1 120	

2.7 铸造铍青铜的选材和应用

(1) 高强度铸造铍青铜

1) ZCuBe2 合金具有很高的强度、硬度，高的耐磨性和耐蚀性，受冲击时不产生火花，主要用于塑料成形模具、压铸塞杆头、安全工具、凸轮、垫圈、轴承、齿轮、轴套、阀体、电阻焊电极、电极夹、各种通信、纺织、航空、商用机器的精密部件、机械、武器部件。

2) ZCuBe2.4 比 ZCuBe2 合金的强度和硬度更高，适用于塑料成形模具、轴承、阀等。

3) ZCuBeAl8-Fe1Co1 兼有铝青铜和铍青铜的特点，有很高的强度，优良的耐蚀性和耐海水冲击腐蚀性能，良好的铸造工艺性能，主要用于塑料零件铸模，使用寿命比 C82500 (ZCuBe2) 长。

(2) 高传导铸造铍青铜

ZCuBe0.6-Co2.5 合金和 ZCuBe0.6-Ni2 合金具有很高的导电导热性，有较高的强度、硬度、良好的耐磨性和优良的高温抗氧化性以及较高的热强性。前者主要用作电阻焊头、电极夹、断路器部件、开关机构部件、压铸塞杆头、闸轮、连铸机用铸模；后者主要用作缝焊机电极、凸焊机铸、点焊头、水冷电极夹、离合器环。

3 锡磷青铜

磷能提高锡青铜的工艺性能与力学性能，含磷的锡青铜称锡磷青铜（简称磷青铜），广泛用作弹性材料。加工锡磷青铜的磷含量一般不超过 0.45%，因为磷含量大于 0.5%时在 637℃左右会发生共晶 - 包晶反应 $L + \alpha \rightleftharpoons \beta + Cu_3P$，引起热脆。合金的磷含量大于 0.3%时，组织中会出现铜与铜的磷化物（Cu_3P）组成的共晶体。

磷是铜合金的有效脱氧剂，元素磷的加入，能提高合金的强度、硬度、弹性极限、弹性模量和疲劳强度，改善耐蚀性能和铸造时的流动性。缺点是加大铸锭的反偏析。

材料冷加工前的晶粒尺寸和加工后的低温退火（180～300℃）对锡磷青铜的力学性能有较大的影响。晶粒细小时，材料的强度、硬度、弹性模量、疲劳强度都比粗晶粒材料的高，但塑性却稍低一些。冷加工锡磷青铜在 200～260℃退火 1～2 h 后，其强度、塑性、弹性极限与弹性模量均有所提高，弹性稳定性也能得到改善。

QSn4-0.3 合金是低锡含量的锡磷青铜，具有较高的强度、硬度、弹性，优良的耐蚀性和疲劳性能。还具有良好的冷、热加工性。该合金主要制成各种尺寸的扁管和圆管，供作包端管等类型的弹性敏感元件使用。选用合适冷变形率的管材，可以提高包端管成形的成品率。低温退火能改善元件的非弹性行为。

QSn6.5-0.1 是铜-锡-磷三元合金，该合金具有高的强度、弹性、耐磨性和抗磁性，有良好的冷加工性、耐蚀性、焊接性和切削加工性，在仪器仪表制造中得到广泛的应用。主要用作弹性元件和高强度的耐磨零件。

QSn6.5-0.4 是含有较高锡、磷的锡磷青铜，合金组织在 α 相固溶体中会出现磷化物 Cu_3P 组成的共晶体，是造成合金热加工时热裂的根源。该合金具有高的强度、硬度、弹性和耐磨性，在淡水和海水中耐蚀性良好，易于焊接。作为高强度、高弹性材料和耐磨材料在仪器仪表制造业中得到广泛的应用，主要用于制造弹性元件、耐磨零件及金属网等。

QSn7-0.2 是高锡含量的锡磷青铜。在合金组织 α 相固溶体中会产生少量的（α+δ）共析体，δ 相是硬脆相，含量多

时会降低合金的塑性和力学性能。该合金具有很高的强度、硬度、高的弹性和耐磨性。在大气、淡水和海水中有高的耐蚀性。易于焊接。主要用于制造中等载荷和中等滑动速度下承受摩擦的零件，还可制造弹簧、簧片及其他零件。

锡磷青铜的牌号见表4.5-26。

表4.5-26　锡磷青铜牌号

国别	GB（中国）	ISO	ASTM（美国）	JIS（日本）	ГОСТ（俄罗斯）	DIN（德国）	BS（英国）	NF（法国）
牌号	QSn6.5-0.1	CuSn6	C51900	C5191	БрОФ 6.5-0.15	CuSn6	PB103	CuSn6P
	QSn6.5-0.4	CuSn6	C51900	C5191	БрОФ 6.5-0.4	CuSn6	PB103	CuSn6P
	QSn7-0.2	CuSn8	C52100	C5210	БрОФ 7-0.2	CuSn8	PB101	CuSn8P
	QSn4-0.3	CuSn4	C51100	C5101	БрОФ 4-0.25	CuSn4	—	CuSn4P

3.1　化学成分（表4.5-27）

表4.5-27　锡磷青铜的化学成分（摘自GB/T 5231—2001）　%

合　金	元素	Sn	Al	Zn	Mn	Fe	Pb	Ni	As[①]	Si	P	Cu	杂质总和
QSn6.5-0.1	最小值	6.0	—	—	—	—	—	—	—	—	0.10	余量	—
	最大值	7.0	0.002	0.3	—	0.05	0.2	0.2	—	—	0.25		0.10
QSn6.5-0.4	最小值	6.0	—	—	—	—	—	—	—	—	0.26	余量	—
	最大值	7.0	0.002	0.3	—	0.02	0.2	0.2	—	—	0.40		0.10
QSn7-0.2	最小值	6.0	—	—	—	—	—	—	—	—	0.10	余量	—
	最大值	8.0	0.01	0.3	—	0.05	0.2	0.2	—	—	0.25		0.15
QSn4-0.3	最小值	3.5	—	—	—	—	—	—	—	—	0.03	余量[②]	—
（C51100）	最大值	4.9	—	0.3	—	0.01	0.05	0.2	0.002	—	0.35		—
QSn8-0.3	最小值	7.0	—	—	—	—	—	—	—	—	0.03	余量[②]	—
（C52100）	最大值	9.0	—	0.2	—	0.1	0.05	0.2	—	—	0.35		—

① 砷、铋和锑可不分析，但供方必须保证不大于界限值。
② Cu+所列出元素总和≥99.5%。

3.2　物理及化学性能

1）热性能见表4.5-28～表4.5-30。

表4.5-28　锡磷青铜的热性能

合金	熔化温度范围 /℃	热导率 $/W\cdot(m\cdot K)^{-1}$	比热容 $/J\cdot(kg\cdot K)^{-1}$	凝固线收缩率 /%	线胀系数 $/10^{-6}K^{-1}$
QSn4-0.3	974～1 062	83.1	377	1.45	17.2(20～100℃) 19.4(20～400℃)
QSn6.5-0.1	996	54.4	307	1.45	17.2(20℃) 18.9(400℃)
QSn6.5-0.4	996	83.7	370	1.45	17.0(20℃) 19.0(20～300℃)
QSn7-0.2	1 025	54.4	376.8	1.5	18.1(20℃) 19.0(400℃)

表4.5-29　QSn6.5-0.1锡青铜的低温平均热导率[①]

温度/℃	-269～-253	-269～-196	-253～-196
热导率$/W\cdot(m\cdot K)^{-1}$	6.238	15.324	19.427

① 被测线材直径3 mm。

表4.5-30　QSn6.5-0.1锡青铜的低温线胀系数

温度/℃	17	7	-3	-23	-43	-63	-83	-103	-123	-143	-163	-183
线胀系数 $/10^{-6}K^{-1}$	16.90	16.76	16.61	16.28	15.90	15.05	15.50	14.53	13.88	12.96	11.69	10.03

2）密度见表 4.5-31。

3）电学性能见表 4.5-32。

4）磁性能　QSn6.5-0.1 有良好的抗磁性。

5）化学性能　锡磷青铜的抗氧化性能优于纯铜，在大气、淡水和海水中有高的耐腐蚀性能，其中 QSn4-0.3、QSn6.5-0.1 和 QSn6.5-0.4 在天然海水中的腐蚀速度分别为 0.03 mm/a、0.03 mm/a 和 0.04 mm/a，QSn7-0.2 合金在海水中腐蚀速度小于 0.001 8 mm/a，对稀硫酸、有机酸等也有好的耐蚀性。部分锡磷青铜在不同环境中的腐蚀速度见表 4.5-33。

表 4.5-31　锡磷青铜室温密度值

合金	QSn4-0.3	QSn6.5-0.1	QSn6.5-0.4	QSn7-0.2
密度/g·cm^{-3}	8.86	8.65	8.8	8.65

表 4.5-32　锡磷青铜室温电学性能

合　金	QSn4-0.3	QSn6.5-0.1	QSn6.5-0.4	QSn7-0.2
电导率/%IACS	20	13	10	12
电阻率/μΩ·m	0.086	0.13	0.176	0.14
电阻温度系数 /10^{-4}K^{-1}	—	6.23	6～23	6～23

3.3　热加工与热处理规范（表 4.5-34）

3.4　力学性能

1）技术标准规定的性能见表 4.5-35。

表 4.5-33　锡磷青铜对酸的抗蚀性

合金	酸	浓度/%	温度/℃	腐蚀速度	
				质量/g·(m^2·h)$^{-1}$	深度/mm·a^{-1}
QSn6.5-0.4	硫酸	10	20	0.213	—
		10	80	0.746	—
		55	20	0.040	—
		55	80	0.217	—
QSn6.5-0.1	硫酸	0.5	190（1.2～1.4 MPa）①	0.17	0.19
		12.5（发烟硫酸）	190（1.2～1.4 MPa）①	0.58	0.55
		浓的	20	0.06	0.06
			40	0.13	0.13
	醋酸酐	生产过程中获得的冰醋酸		可　用	可　用
					有爆炸危险
	硝酸铵	结　晶		—	不可用
	安叶林	纯　的		—	不可用
	氟化铵	溶　液		—	不可用
	乙　炔	潮湿的		—	（在 480℃试验）不可用
	苯　胺	纯　的		—	不可用
	硫	熔　体		—	不可用
	甲　醇	—		—	可　用
	乙　醇	96		—	可　用
	丁　醇	—		—	可　用
	苯	纯　苯		—	可　用
	砷　酸	溶　液		—	可　用

①　指溶液蒸气压。

表 4.5-34　锡磷青铜的热加工与热处理规范

合　金	QSn4-0.3	QSn6.5-0.1	QSn6.5-0.4	QSn7-0.2
退火温度/℃	500～650	500～620	550～620	500～680
消除应力退火/℃	150～280	150～280	200～300	200～260
热加工温度/℃	750～780	—	—	750～850

注：合金不能热处理强化。

表 4.5-35　锡磷青铜技术标准规定的性能

合　金	品　种	状　态	δ、d 或 $D\times S$/mm	σ_b/MPa	伸长率/%		技术标准
					δ_{10}	δ_5	
					≥		
QSn4-0.3	棒　材	Y	5～12	410	8	10	GB/T 4423—1992
			>12～25	390	10	13	
			>25～40	355	12	15	
	带　材	M	>0.5～2.0	294	40	—	GB/T 2059—2000
		Y		539～687	3	—	
		T		637	2	—	

续表 4.5-35

合金	品种	状态	δ、d 或 $D\times S$/mm	σ_b/MPa	伸长率/% δ_{10} ≥	伸长率/% δ_5 ≥	技术标准
QSn4-0.3	板材	M Y T	0.5~12.0	294 490~687 637	40 3 1	— — —	GB/T 2040—2002
	毛细管	M Y	ϕ(0.5~3.0)× ϕ(0.3~2.5)	325 490	30 —	— —	GB/T 1531—1994
	管材	M Y	圆管(4~25)×(0.15~1.80) 椭圆管(4~50)×(2.5~6)×(0.15~1.0) 扁管(7.5~20)×(5~7)×(0.15~1.0)	323~480 490~637	35 2	— —	GB/T 8892—1988
QSn6.5-0.1	带材	M Y_2 Y T	0.05~2.0	294 440~569 539~687 667	40 10 8 2	— — — —	GB/T 2059—2000
	板材	R M Y_2 Y T	9~50 0.2~12	290 294 440~569 490~687 637	38 40 8 5 1	— — — — —	GB/T 2040—2002
	棒材	R Y	30~40 40~100 100~120 5~12 12~25 25~40	355 345 305 470 440 410	50 55 58 11 13 15	55 60 — 13 15 18	GB/T 13808—1992 GB/T 4423—1992
	线材	M Y	0.1~6.0 >0.1~1.0 >1.0~2.0 >2.0~4.0 >4.0~6.0	350 880~1 130 860~1 060 830~1 030 780~980	35~45 — — — —	— — — — —	GB/T 14955—1994
QSn6.5-0.4	带材	M Y T	0.05~2.0	294 539~687 667	40 8 2	— — —	GB/T 2059—2000
	板材	M Y T	0.2~12.0	294 490~687 637	40 5 1	— — —	GB/T 2040—2002
	棒材	R Y	30~40 40~100 100~120 5~12 12~25 25~40	35 345 305 470 440 410	50 55 58 11 13 15	55 60 — 13 15 18	GB/T 13808—1992 GB/T 4423—1992
	线材	M Y	0.1~6.0 0.1~1.0 >1.0~2.0 >2.0~4.0 >4.0~6.0	350 880~1 130 860~1 060 830~1 030 780~980	35~45 — — — —	— — — — —	GB/T 14955—1994

续表 4.5-35

合金	品种	状态	δ、d 或 $D\times S$/mm	σ_b/MPa	伸长率/% δ_{10} ≥	伸长率/% δ_5 ≥	技术标准
QSn7-0.2	棒材	R	40～120	355	55	64	GB/T 13808—1992
		Y	5～40	440	15	19	GB/T 4423—1992
		T		180	—	—	
	线材	M	0.1～1.0	350	35	—	GB/T 14955—1994
			1.0～6.0		45	—	
		Y	0.1～1.0	880～1 130	—	—	
			>1.0～2.0	860～1 060	—	—	
			>2.0～4.0	830～1 030	—	—	
			>4.0～6.0	780～980	—	—	

注：M 态的 δ 值为 L_0 = 100 mm。QSn7-0.2 棒材 HBS 为 70（R 态），130～200（Y 态）。

2）各种状态下的力学性能

① 典型的力学性能见表 4.5-36～表 4.5-38。

表 4.5-36 加工锡青铜的典型室温力学性能

合金	状态	弹性模量 E/GPa	抗拉强度 σ_b/MPa	比例极限 σ_p/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	断面收缩率 ψ/%	冲击吸收功 A_K/J	硬度 HB	摩擦因数 有润滑剂	摩擦因数 无润滑剂
QSn6.5-0.1	软态	—	350～450	—	200～250	60～70	—	—	70～90	0.01	0.12
	硬态	124	700～800	450	590～650	7.5～12	—	—	160～200	0.01	0.12
QSn6.5-0.4	铸件	—	250～350	100	140	15～30	—	50～60	—	0.01	0.12
	软态	—	350～450	—	200～250	60～70	—	—	70～90	0.01	0.12
	硬态	112	700～800	450	590～650	7.5～12	—	—	160～200	0.01	0.12
QSn7-0.2	软态	108	360	85	230	64	50	178	75	—	—
	硬态	—	500	—	—	15	20	70	180	0.012 5	0.2
QSn4-0.3	软态	100	340	—	—	52	—	—	55～70	—	—
	硬态	—	600	350	540	8	—	—	160～180	—	—

表 4.5-37 C51100（QSn4-0.3）锡磷青铜 1 mm 厚带材在不同状态下的典型力学性能

状态	抗拉强度 /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	标距 50 mm 的伸长率 δ/%	硬度 HRB	硬度 HR30T
OS 050	315	110	48	70HRF	—
OS 035	330	130	47	73HRF	—
OS 025	345	145	46	75HRF	—
OS 015	350	160	46	76HRF	—
H 01	380	295	36	48	45
H 02	425	385	19	70	65
H 03	510	495	11	84	72
H 04	550	530	7	86	74
H 06	635	615	4	91	78
H 08	675	655	3	93	79
H 10	710	675	2	95	80

表 4.5-38 C52100（QSn7-0.2）锡磷青铜在不同状态下的典型力学性能

状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度[①] $\sigma_{0.2}$/MPa	标距 50 mm 的伸长率 δ/%	硬度 HRF	硬度 HRB	硬度 HR30T
板带材，厚度 1 mm						
OS 050	380	—	70	75	—	—
OS 035	400	—	65	80	—	—
OS 025	415	165	63	82	50	—
OS 015	425	—	60	85	—	—
H 02	525	380	32	—	84	73
H 04	640	495	10	—	93	78
H 06	730	550	4	—	96	80
H 08	770	—	3	—	98	81
H 10	825	—	2	—	100	82
棒材，直径 13 mm						
H 02	550	450	33	—	85	—

续表 4.5-38

状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度① $\sigma_{0.2}$/MPa	标距 50 mm 的伸长率 δ/%	硬度		
				HRF	HRB	HR30T
线材、直径 2 mm						
OS 035	415	165	65	—	—	—
H 01	560	—	—	—	—	—
H 02	725	—	—	—	—	—
H 04	895	—	—	—	—	—
H 06	965	—	—	—	—	—

① 载荷下延伸 0.5%。

② 硬度见表 4.5-39 和表 4.5-40，图 4.5-16～图 4.5-18。

表 4.5-39 锡磷青铜供应状态的室温硬度

合金	状态	HBS	合金	状态	HBS
QSn4-0.3	M	70～90	QSn7-0.2	Y，棒材	175～178
	Y	160～180		R，棒材	80～89
QSn6.5-0.4	M，带材	70～90	QSn6.5-0.4	Y，带材	160～200

表 4.5-40 退火温度①对冷轧 QSn6.5-0.1 锡青铜②硬度 HV 的影响

温度/℃	加工率/%								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
室温	124	148	179	200	221	233	245	258	279
100	127	150	179	203	217	225	243	260	281
200	124	151	177	200	210	226	240	264	277
300	113	128	167	184	194	213	228	240	251
400	100	119	120	104	109	111	122	122	124
500	91	92	100	92	98	100	96	90	86
600	88	89	86	91	93	84	84	80	79
700	87	87	80	83	83	79	79	74	71
800	87	85	80	82	82	75	78	72	70

① 保温 30 min。

② 合金成分（%）：6.65Sn，0.12P，<0.01Fe，<0.005Pb，<0.01Zn，其余为铜。

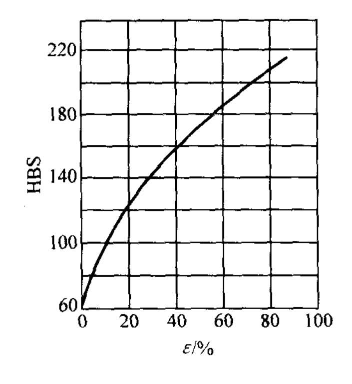
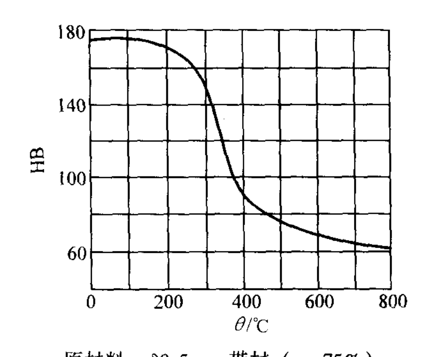


图 4.5-16 QSn4-0.3 硬度与变形率的关系

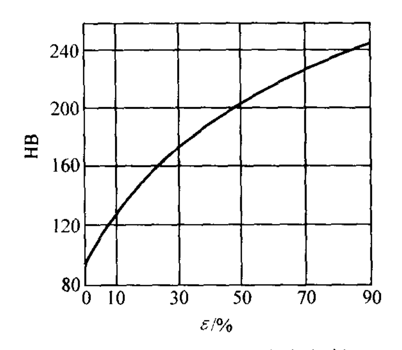
3）拉伸性能

① 室温拉伸性能 锡磷青铜供应状态室温拉伸性能见表 4.5-41，在不同变形率、不同退火温度后的室温拉伸性能见图 4.5-19～图 4.5-26。



原材料：δ0.5 mm 带材（ε=75%）

图 4.5-17 QSn4-0.3 硬度与退火温度的关系



原材料：620℃退火 2h 的软板材

图 4.5-18 QSn7-0.2 硬度与加工率的关系

表 4.5-41 供应状态材料室温拉伸性能

合金	品种	状态	σ_b/MPa			δ/%		
			$\bar{X}$	min	max	$\bar{X}$	min	max
QSn4-0.3	管材	M	375	—	—	46	—	—
		Y	575	460	640	8	3	14
QSn6.5-0.1	带材	M	380	345	430	68	45	79
		Y_2	525	480	570	35	23	43
		Y	615	540	685	19	5	36
		T	725	665	805	7	2	14
	棒材	R（$d<40$）	370	360	382	64	61	68
		R（$d=40～100$）	380	360	420	66	57	71
		R（$d>100$）	350	325	37	72	57	82
	线材	Y（$d=0.1$）	1 000	900	1 060	—	—	—
QSn6.5-0.4	带材	M	370	—	—	76	—	—
		Y	605	540	685	22	8	34
		T	710	665	755	12	4	21
	棒材	R	390	—	—	66	—	—
	线材	M	440	400	490	60	44	70
		T	975	—	—	4	—	—
QSn7-0.2	棒材	R	385	355	430	65	47	73
		M	435	—	—	40	—	—
		Y	505	450	570	29	20	38
		T	600	—	—	22	—	—
	线材		940	—	—	2	—	—

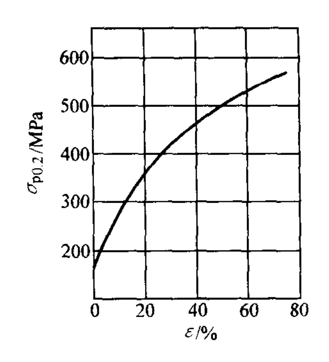


图 4.5-19　不同变形率 QSn4-0.3 的屈服强度
原材料：软带材

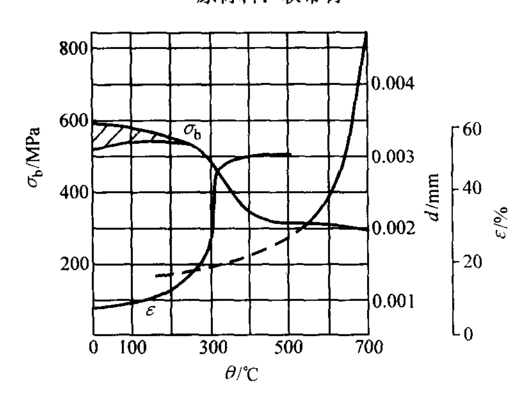


图 4.5-20　QSn4-0.3 拉伸性能和晶粒度与退火温度（保温 1 h）的关系
原材料：压力计用 6.8 mm×5 mm×0.9 mm 的硬管材

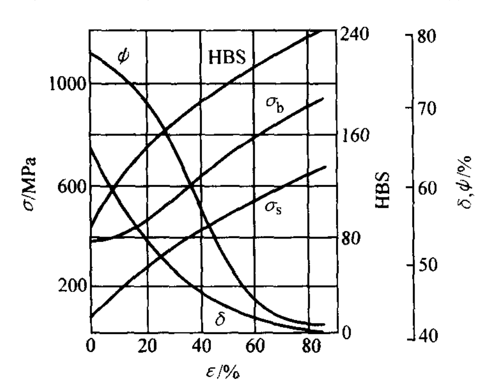


图 4.5-21　QSn6.5-0.1 的拉伸性能与加工率的关系
原材料：软带材

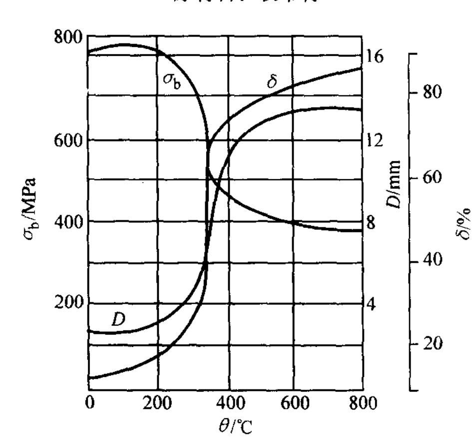


图 4.5-22　QSn6.5-0.1 的拉伸性能与退火温度的关系
原材料：硬带材，D—杯突深度

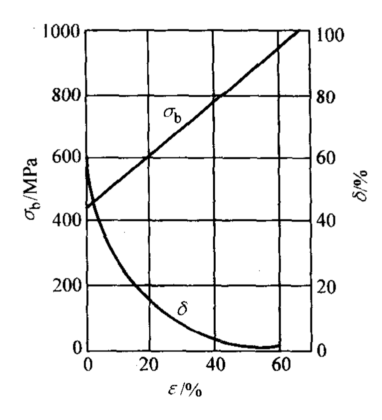


图 4.5-23　QSn6.5-0.4 的拉伸性能与加工率的关系
原材料：厚 4 mm 的软带材

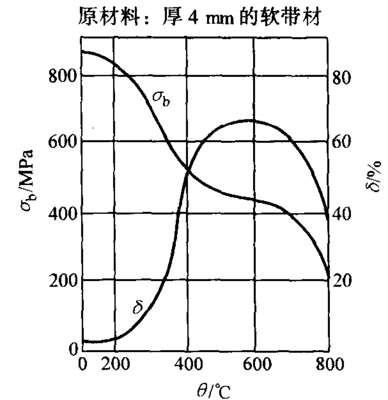


图 4.5-24　QSn6.5-0.4 的拉伸性能与退火温度（保温 1 h）的关系
原材料：厚 4 mm 的硬线材

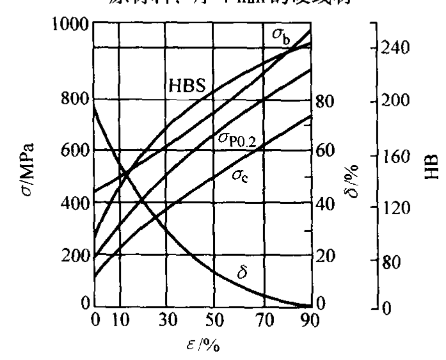


图 4.5-25　QSn7-0.2 的力学性能与加工率的关系

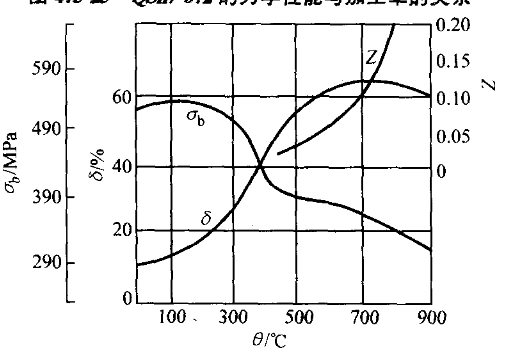


图 4.5-26　QSn7-0.2 拉伸性能与退火温度（保温 40 min）的关系
原材料：ϕ30 mm 的棒材，ε = 20%

② 高温、低温力学拉伸性能　锡磷青铜高温拉伸性能见图 4.5-27 和图 4.5-28，低温拉伸性能见图 4.5-29、图 4.5-30 和表 4.5-42。

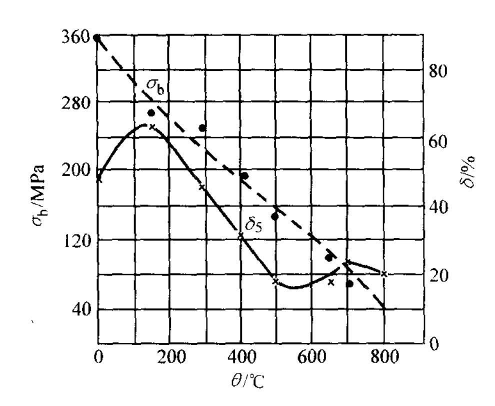


图 4.5-27 QSn6.5-0.1 的高温拉伸性能
原材料：半连续扁锭（640 mm×140 mm）
经 700℃，8 h 均匀化处理

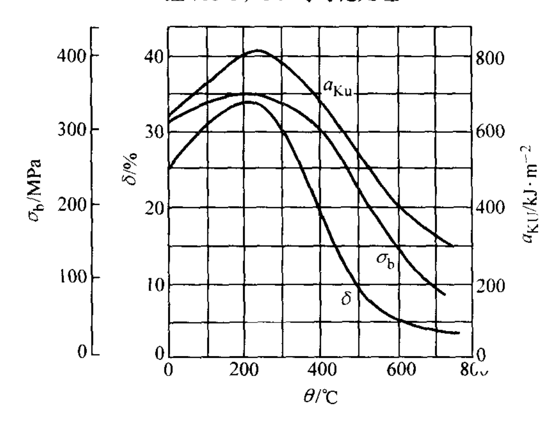


图 4.5-28 QSn6.5-0.4 的高温力学性能

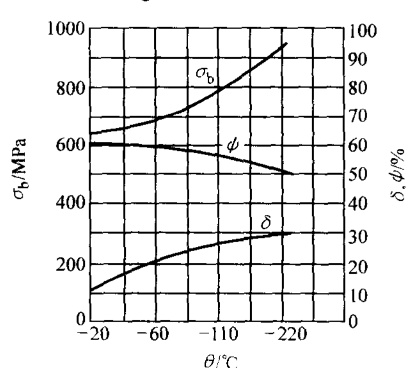


图 4.5-29 QSn6.5-0.15 拉伸性能在低温下的变化
原材料：冷轧板材

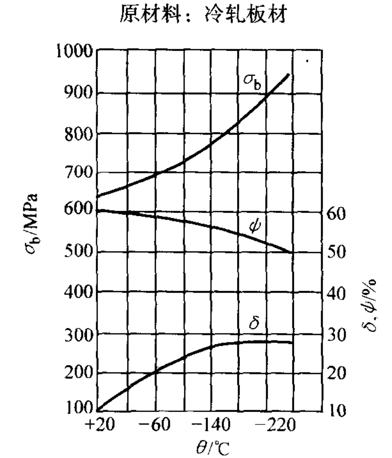


图 4.5-30 QSn6.5-0.4 的拉伸性能在低温下的变化

表 4.5-42 QSn6.5-0.4 锡青铜的低温拉伸性能

性能	温度/℃		
	17	-196	-253
抗拉强度 σ_b/MPa	630	840	950
伸长率 δ/%	12	29	29
断面收缩率 ψ/%	61	54	51

4）冲击性能 QSn7-0.2 的 a_{KU} = 686 kJ/m^2（Y 态），a_{KU} = 1 670 kJ/m^2（M 态）；QSn6.5-0.4 的高温冲击性能见图 4.5-28。

5）耐磨性能 QSn7-0.2 硬态棒摩擦因数 μ = 0.012 5（有润滑），μ = 0.2（无润滑）。

6）抗应力松弛和蠕变性能 锡磷青铜抗应力松弛性能见图 4.5-31～图 4.5-33 和表 4.5-43，蠕变性能见表 4.5-44。

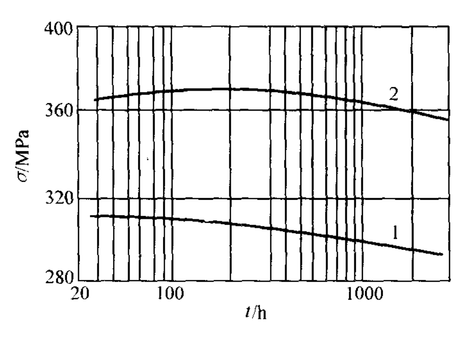


图 4.5-31 QSn4-0.3 室温应力松弛
1—ε = 60%；2—经 150℃，30 min 退火

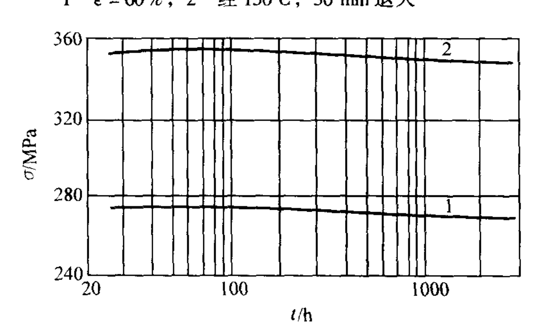


图 4.5-32 QSn6.5-0.1 的室温应力松弛
1—ε = 60%；2—经 150℃，30 min 退火

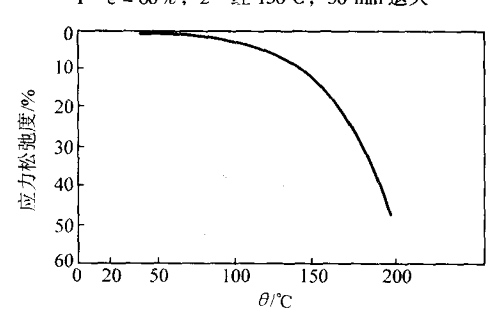


图 4.5-33 QSn6.5-0.4 在 $0.5\sigma_e$ 载荷下，于不同温度试验 100 h 的应力松弛

表 4.5-43 QSn6.5-0.1 高温应力松弛

状态	θ/℃	试验时间/h	σ_0/MPa	$\frac{\sigma_0-\sigma_t}{\sigma_t}$/%
Y	100	100	245	1.0
E = 80%并低温退火	150	100	245	15.0

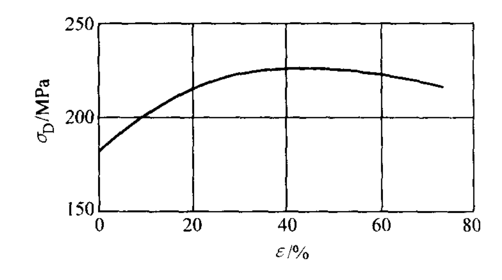
表 4.5-44　QSn6.5-0.4 锡青铜的蠕变速度

材料状态	晶粒尺寸/mm	试验温度/℃	应力/MPa	蠕变速度/10^{-2} h^{-1}
软态	0.05	150	30	0.003
			70	0.008
			100	0.019
			140	—
		200	14	0.003
		200	28	—
		260	7	0.003 6
		260	35	0.018
硬态	加工率 84%	150	30	0.000 9
		150	100	0.003 2
		150	140	0.003 7
		150	200	0.008 0
		200	40	0.006 1
		200	70	0.020
		260	7	0.062

7）疲劳性能　QSn4-0.3 供应状的疲劳强度极限（循环次数 N 为 5×10^7 周）$\sigma_D=215$ MPa（M 态管材），$\sigma_D=348$ MPa（Y 态管材）。各材料高周疲劳见表 4.5-45 和图 4.5-34～图 4.5-36。

表 4.5-45　QSn6.5-0.1 循环次数 $N=10^7$ 周时，不同加工率材料的疲劳强度极限和经低温退火后的疲劳强度

状态（ε/%）	Y_2（30）	Y（50）	T（90）
σ_D/MPa	260	345	365
σ_D/MPa（150℃，30 min 退火）	295	365	460



循环次数 $N=10^8$ 周

图 4.5-34　不同变形率 QSn4-0.3 的疲劳极限

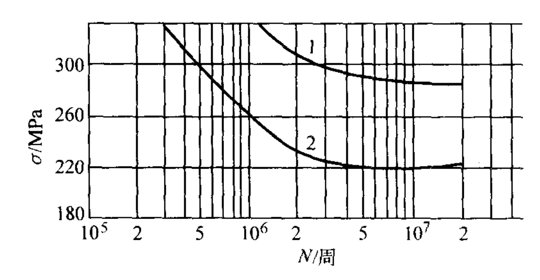


图 4.5-35　QSn6.5-0.4 的疲劳强度与循环次数的关系
1—经微细晶粒化处理的；2—未经微细晶粒化处理的

8）弹性性能

① 弹性模量　QSn6.5-0.4 合金 Y 态的弹性模量为 109.8 GPa，QSn7-0.2 合金 M 态棒的弹性模量为 105.9 GPa，QSn6.5-0.1 合金的弹性模量见表 4.5-46。

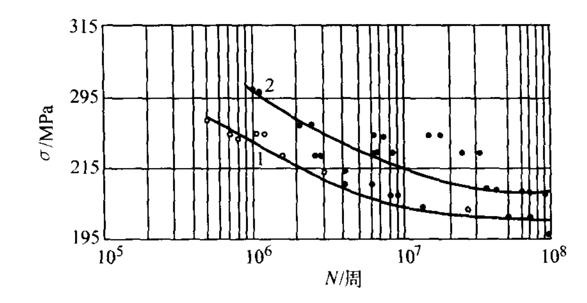


图 4.5-36　加工和低温退火的 QSn7-0.2 的疲劳强度极限
原材料：合金含 8%Sn，0.1%P，厚 0.508 mm 条材
1—ε = 60%；2—冷轧后经 250℃低温退火 100 h

表 4.5-46　QSn6.5-0.1 的弹性模量

状态	取样方向	试验方法	E/GMPa
Y 棒	纵向	拉伸	121.6
T 带	纵向	弯曲	100.8
	横向		128.4

QSn4-0.3 合金的切变模量为 41.4 GPa，加工和热处理对锡磷青铜弹性的影响见图 4.5-37～图 4.5-39。

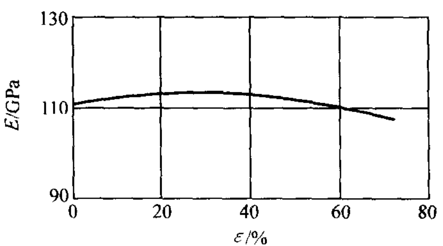


图 4.5-37　不同加工率 QSn4-0.3 的弹性模量

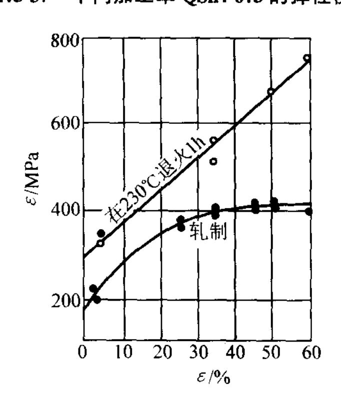


图 4.5-38　加工率和低温退火对 QSn7-0.2 锡青铜弹性极限的影响

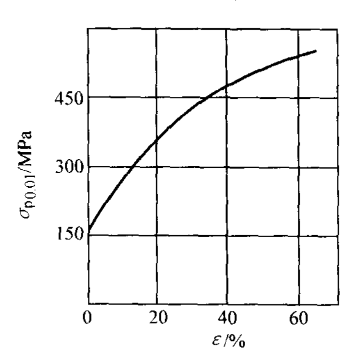


图 4.5-39　不同冷变形率 QSn4-0.3 的条件比例极限

② 规定非比例伸长应力见表 4.5-47。

表 4.5-47　QSn4-0.3 硬态（ε = 80%）经 150℃，30 min 退火后的弯曲规定非比例伸长应力

$\sigma_{p0.002}$/MPa	$\sigma_{p0.005}$/MPa	$\sigma_{p0.01}$/MPa
415	480	540

3.5　工艺性能

1) 熔炼与铸造工艺　QSn4-0.3 合金有较好的熔铸工艺性能。由于熔体吸气性强，熔炼时应使用经煅烧过的木炭覆盖。用工频有芯或无芯感应电炉熔炼，以烟灰加适量片状石墨粉作熔体覆盖剂，用半连续铸造或水平连续铸造工艺浇注铸锭。铸造温度为 1 160 ~ 1 200℃。若用铁模铸造，出炉温度为 1 200 ~ 1 250℃。

QSn6.5-0.1 、QSn6.5-0.4 和 QSn7-0.2 合金通常采用工频（有芯或无芯）或中频感应电炉熔炼，以木炭为覆盖剂，熔化后加铜-磷中间合金。在烟灰加适量片状石墨粉覆盖下，用半连铸或水平连铸工艺铸锭。QSn6.5-0.1 合金铸造温度为 1 150 ~ 1 200℃。当采用铁模浇铸时，出炉温度为 1 200 ~ 1 250℃。QSn6.5-0.4 和 QSn7-0.2 合金铸造温度为 1 160 ~ 1 240℃。

2) 成形性能　锡磷青铜具有良好的冷加工性。其中，QSn4-0.3 合金还具有良好的热加工性，可以用拉伸、弯曲、压扁、剪切等方法加工。QSn6.5-0.1 合金总加工率可达 90% 以上，同时还具有良好的热加工性。QSn6.5-0.4 合金能冲压、模压、拉伸、弯曲等加工，在热状态下也可加工，但热裂趋向较大。QSn7-0.2 合金可以冲切、拉伸、弯曲和冲压等，也可热加工，如挤压。

3) 焊接性能　锡磷青铜有良好的焊接性。易于锡焊、铜焊、闪光焊，也能进行气体保护电弧焊、点焊，不宜埋弧焊和电渣焊。

4) 切削加工与磨削性能　锡磷青铜的切削加工性为易切削黄铜 HPb63-3 的 20%。

3.6　选材和应用实例

QSn4-0.3 合金在航空工业主要用扁管制作各种测压表的包端管。使用中应注意针对成形要求，适宜地选择材料的供应状态和对材料进行消除应力的低温退火，以防压扁成形开裂。

QSn6.5-0.1 合金产品被广泛用于制造弹性元件、精密仪器仪表中的耐磨零件和抗磁零件。在航空工业中主要用于制造各种高度表、升降速度表的弹簧、连杆、垫圈、小轴，测压表的膜片、膜盒及波纹管等。对制造零件进行消除应力的热稳化处理能提高该材料的抗疲劳性能。

QSn6.5-0.4 合金产品作为弹性材料广泛用于制造弹性元件、耐磨零件和金属网。在航空工业中主要用作航空仪表，如组合空速表、进气压力表等的膜片、弹簧片等。

QSn7-0.2 合金主要用于制造在中等载荷和中等滑动速度下工作的耐磨零件和结构零件。如抗磨垫圈、轴承、轴套、涡轮等；还可以制造弹簧、簧片及其他机械、电气零件。

表 4.5-48 列出了锡磷青铜常见品种规格和供应状态。

表 4.5-48　品种规格与供应状态

合　金	品　种	d，δ 或 $D \times S$/mm	供应状态	标　准
QSn4-0.3	棒　材	5 ~ 40	Y	GB/T 4423—1992
	带　材	0.05 ~ 2.0	M、Y、T	GB/T 2059—2000
	板　材	0.2 ~ 12.0	M、Y、T	GB/T 2040—2002
	管　材	毛细管(ϕ0.5 ~ 3.0) × (ϕ0.3 ~ 2.5)	M、Y	GB/T 1531—1994
		圆管(4 ~ 25) × (0.15 ~ 1.80) 椭圆管(5 ~ 15) × (2.5 ~ 6) × (0.15 ~ 1.0) 扁管(7.5 ~ 20) × (5 ~ 7) × (0.15 ~ 1.0)	M、Y	GB/T 8892—1988
QSn6.5-0.1	带　材	0.05 ~ 2.0	M、Y、Y_2、T	
	板　材	9 ~ 50	R	
		0.2 ~ 12	M、Y、Y_2、T	
	棒　材	30 ~ 120	R	
		5 ~ 40	Y	
	线　材	0.1 ~ 6.0	Y	
QSn6.5-0.4	带　材	0.05 ~ 2.0	M、Y、T	
	板　材	0.2 ~ 12	M、Y、T	
	棒　材	30 ~ 120	R	
		5 ~ 40	Y	
	线　材	0.1 ~ 6.0	M、Y	
QSn7-0.2	棒　材	40 ~ 12	R	
		5 ~ 40	Y、T	
	线　材	0.1 ~ 6.0	M、Y	

4 硅青铜

硅青铜是一类含有 Si、Mn、Ni 等合金元素的铜合金，Si 含量一般不超过3.5%。杂质元素有 As、Sb、Sn、Al、Pb 和 P等。Fe 和 Zn 是杂质元素，但有时作合金元素加入。适量 Mn 对硅青铜的力学性能、耐蚀性能与工艺性能有益。Cu-Si 合金于555℃发生共析转变 $\beta \to \alpha + \delta$，但在生产的非平衡结晶条件下，共析转变实际上很难发生，因而β相可保留到室温。硅青铜几乎没有沉淀硬化效果，但力学性能比锡青铜的高，成本也稍低一些，可作为后者的代用材料，其中作为高弹性用途的主要是 QSi3-1 合金。

QSi3-1 是铜-硅-锰三元合金，含有3%硅和1%锰的硅青铜，高温呈单相α固溶体状态。当冷却到450℃以下时，有少量脆性相 Mn_2Si（有文献认为是 MnSi）析出，但强化效果极弱，不能进行热处理强化。QSi3-1 合金拉制棒材在贮存期间发生的自裂现象，就是由于 Mn_2Si 相析出，产生的相变应力引起的。合金的 Si 含量越高，沉淀的 Mn_2Si 也越多，发生自裂的倾向也越大。把硅含量控制在3%以下与对材料进行低温退火可消除自裂现象。该合金力学性能高，抗磨与耐腐蚀性好，可焊接，无磁性，冲击时不起火花，冷、热成形性能好，无低温脆性，多用于制造弹性零件、抗磨件和低温装备等。

QSi3-1 合金的牌号见表4.5-49。

4.1 化学成分

按 GB/T 5233—2001，QSi3-1 合金的化学成分见表4.5-50。

4.2 物理及化学性能

1）物理性能见表4.5-51和表4.5-52。

表4.5-49　QSi3-1 硅青铜牌号

国别	GB（中国）	ASTM（美国）	ГОСТ（俄罗斯）	BS（英国）	DIN（德国）	ISO
牌号	QSi3-1	C65800，C65500	БРКМц3-1	CS101	$CuSi_3Mn$	$CuSi_3Mn$

表4.5-50　QSi3-1 加工硅青铜的化学成分　%

合金	元素	Sn	Al	Zn	Mn	Fe	Pb	Sb①	Si	Ni	Ti	Mg	Be	P	As①	Cu	杂质总和
QSi3-1②	最小值	—	—	—	1.0	—	—	—	2.7	—	—	—	—	—	—	余量	—
	最大值	0.25	—	0.5	1.5	0.3	0.03	—	3.5	0.2	—	—	—	—	—		1.1

① 砷、铋和锑可不分析，但供方必须保证不大于界限值。
② 抗磁用的铁含量不大于0.030%。

表4.5-51　QSi3-1 加工硅青铜的物理性能

合金	液相线温度/℃	固相线温度/℃	密度/g·cm^{-3}	线胀系数/10^{-6}K^{-1}		热导率/W·(m·K)$^{-1}$	电阻率/μΩ·m	电导率/%IACS	凝固时线收缩率/%
				200~300℃	20℃				
QSi3-1	1 026.3	971	8.40	18	18.5	37.68	0.150	6.4%（加工率80%的硬态带材）；7%（600℃退火的软态带材）	1.6

表4.5-52　QSi3-1 硅青铜的线胀系数

温度/℃	200	40	20	0	-20	-40	-60	-80	-100	-120	-140	-160	-180	-196
线胀系数 α/10^{-6}K^{-1}	20.2	18.7	18.5	18.4	18.2	17.8	16.6	15.3	14.1	13.35	12.8	12.3	11.7	11.2

2）化学性能　硅青铜对大气、水蒸气、天然淡水、海水有很强的耐蚀性，因为其表面上会形成一层致密而坚固的氧化物保护膜，这层保护膜在上述介质流速不超过1.5 m/s时也不会被破坏，但当流速过快、温度升高（如水温度超过60℃）、或者水中含有二氧化碳和氧时，合金的腐蚀速度增大。

硅青铜在硫酸、盐酸、醋酸、柠檬酸等稀溶液中很稳定，升高温度则腐蚀速度增大，尤其是在浓酸中。硅青铜在浓度不大和温度不高的碱溶液中耐蚀。

硅青铜对低浓度和温度不高的碱溶液有高的耐蚀性。此外，$Fe_2(SO_4)_3$ 有阴极去极化作用，所以含 $Fe_2(SO_4)_3$ 的酸性矿泉水对硅青铜将产生强烈腐蚀；铬酸盐、氯化铁溶液和浓氯化锌溶液会强烈地腐蚀硅青铜。

硅青铜在干燥的氯、溴、氟化氢、硫化氢、氯化氢、二氧化硫、氨等气氛中以及四氯化碳中均耐蚀。当这些介质中含有水汽时，合金耐蚀性降低。乙炔、潮湿氨、氢氧化铵、氯化铵、硝酸铵、铬酸、氯化铁、硫酸铁、潮湿硫化氢、汞、汞盐、硝酸、氰化钾、氢化钠、重铬酸钾、银盐、氢氧化钠、熔融硫、氰酸都会腐蚀硅青铜。

QSi3-1 硅青铜在一些介质中的腐蚀速度见表4.5-53。

表4.5-53　QSi3-1 硅青铜在不同介质中的腐蚀速度

介质	θ/℃	腐蚀速度/mm·a^{-1}	介质	θ/℃	腐蚀速度/mm·a^{-1}
大气	—	0.000 25~0.001 8	30%苛性钠溶液	60	0.048
矿井水	—	0.05~3.32	3%盐酸溶液	70	0.780
海水（静止）	20	0.01	10%盐酸溶液	25	0.091
海水（流动）	50	0.05	30%乙酸溶液	20	0.008
				40	0.323
水蒸气	20	0.015	10%硫酸溶液	25	0.058
5%柠檬酸	20	0.04	25%硫酸溶液	25	0.036
10%硫酸铵	20	0.43	25%硫酸溶液	70	0.094
氯化锌	40	0.59	浓硫酸溶液	20	0.390
94%硫酸+0.2%SO_4	20	0.013	浓硫酸溶液	40	0.740

4.3 热加工和热处理规范

QSi3-1 合金不能热处理强化。退火温度：550 ~ 650℃，消除应力退火温度：270 ~ 300℃，1 h。热加工温度：800 ~ 850℃。

4.4 力学性能

1）技术标准规定的性能见表 4.5-54。
2）典型的力学性能见表 4.5-55 和表 4.5-56。

表 4.5-54 QSi3-1 技术标准规定的性能

品种	状态	δ 或 d/mm	σ_b/MPa	δ_{10}/% ≥	δ_5/% ≥	技术标准
带材	M	—	≥375	45	—	GB/T 2059—2000
	Y	0.15 ~ 0.12	640 ~ 785	5	—	
	T	—	≥735	2	—	
板材	M	—	≥345	40	—	GB/T 2047—1980
	Y	0.4 ~ 12	590 ~ 735	3	—	
	T	—	≥685	1	—	
棒材	R	20 ~ 100	≥345	20	23	GB/T 4423—1992 GB/T 13808—1992
		> 100 ~ 160	295	30	—	
	Y	5 ~ 12	≥490	10	—	
		≥12 ~ 40	≥470	15	—	
线材	Y	0.1 ~ 1.0	880 ~ 1 130	—	—	GB/T 14955—1994
		> 1.0 ~ 2.0	800 ~ 1 060	—	—	
		> 2.0 ~ 4.0	830 ~ 1 030	—	—	
		> 4.0 ~ 6.0	780 ~ 980	—	—	

表 4.5-55 QSi3-1 加工硅青铜的典型力学性能

合金	品种	状态	弹性模量 E/GPa	抗拉强度 σ_b/MPa	弹性极限 σ_e/MPa	屈服点 σ_s/MPa	$N=10^5$ 次疲劳强度 σ_N/MPa	伸长率 δ/%	断面收缩率 ψ/%	冲击韧度 a_K/J·cm^{-2}	布氏温度 HB	摩擦因数 有润滑剂	摩擦因数 无润滑剂
QSi3-1	棒材	冷拉态	120	550	—	—	210	12	—	150	—	0.015	0.4
	线材	软态（700℃退火 1 h）	105	350 ~ 400	120	140	125	50 ~ 60	75	130 ~ 170	80	0.013	0.4
		硬态（加工率 50%）	120	650 ~ 750	640	650	210	1 ~ 5	—	—	180	0.013	0.4
	铸件	金属模铸造的	104	350	—	140 ~ 200	130	25	—	—	85 ~ 90	0.015	0.4

表 4.5-56 加工率对 QSi3-1 力学性能的影响

加工率 /%	原始晶粒 /mm	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	弹性模量 E/MPa	伸长率 δ/%	硬度 HRB	循环次数 N/10^6	疲劳强度 σ_N/MPa
10	0.085	460	310	—	49	84	300	220
20	0.065	590	350	—	37	89	300	219
40	0.125	680	360	100	13	101	300	230
60	—	750	—	105	2	95	100	140

3）硬度　QSi3-1 硅青铜供应状态的硬度见表 4.5-57，不同加工率和不同温度退火对材料硬度的影响见图 4.5-40 和图 4.5-41。

表 4.5-57 QSi3-1 供应状态硬度

品种	板带材		棒材	线材	
HV	105	180	190	100	220
状态	M	Y	Y	M	Y

4）拉伸性能　供应状态 QSi3-1 拉伸性能见表 4.5-58，退火温度及加工率对该合金拉伸性能的影响分别见图 4.5-42，图 4.5-43 和表 4.5-59。

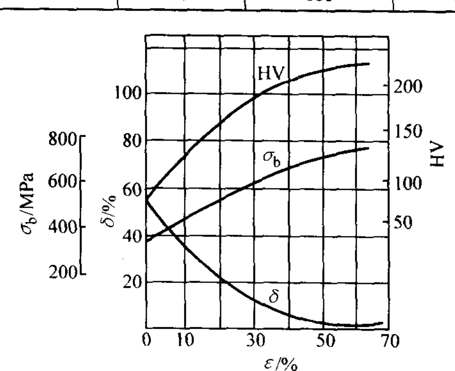


图 4.5-40 QSi3-1 硬度和拉伸性能与加工率的关系
原材料：δ1 mm 软带材

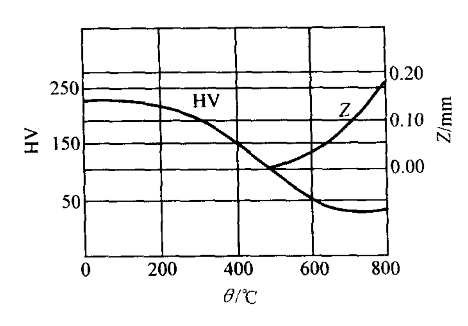


图 4.5-41 QSi3-1 硬度和晶粒度与退火温度（保温 1 h）的关系

原材料：δ1 mm 的带材，ε = 50%

表 4.5-58 供应状态 QSi3-1 的拉伸性能

品种	状态	δ 或 d/mm	σ_b/MPa			δ/%		
			$\bar{X}$	min	max	$\bar{X}$	min	max
带材	M	0.15～0.4	480	450	540	53	46	62
	Y	0.2～0.7	7.5	635	785	11	5	22
	T	0.2～0.6	810	755	885	7	5	13
板材	M	2.0	420	—	—	61	—	—
	Y	0.6～1.0	665	600	735	14	8	19
	T	0.8～2.0	780	755	835	10	8	12
棒材	Y	5～12	595	500	685	19	11	29
		14～40	540	480	655	27	19	36
	R	20～60	435	390	480	51	36	53
线材	Y	0.4～2.0	1 005	921	1 078	—	—	—
		3～4	960	890	1 060	2	1	4
		5～6	915	845	980	3	2	5

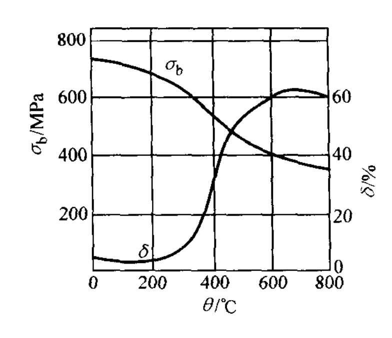


图 4.5-42 QSi3-1 拉伸性能与退火温度（保温 1 h）的关系

原材料：厚 1 mm 的带材，ε = 50%

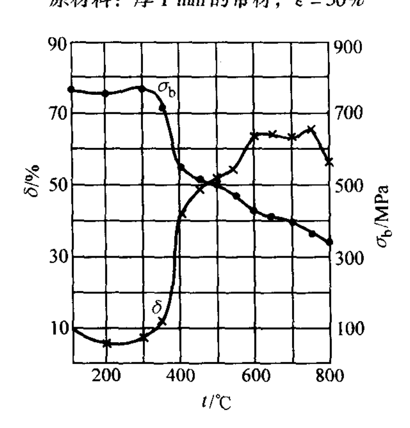


图 4.5-43 QSi3-1 硅青铜的纵向力学性能与退火温度（保温 1.5 h）的关系

表 4.5-59 QSi3-1 不同加工率的拉伸性能

ε/%	0	20	40	60	70
$\sigma_{p0.2}$/MPa	360	470	620	705	725
δ①/%	62	25	10	4	3

① 标距为 50.8 mm。

QSi3-1 硅青铜高温及低温拉伸性能见表 4.5-60，图 4.5-44 和图 4.5-45。

表 4.5-60 QSi3-1 高温拉伸性能

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
σ_b/MPa	420	410	385	351	275	170	120	65	35	20
δ/%	67	64	64	57	58	62	62	63	89	105
ψ/%	78	77	78	63	64	88	95	96	100	100

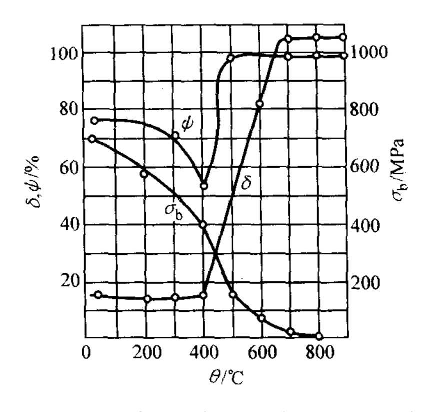


图 4.5-44 QSi3-1 硅青铜的高温力学性能（试验时保温 1 h）

原材料：直径 25 mm 的棒材

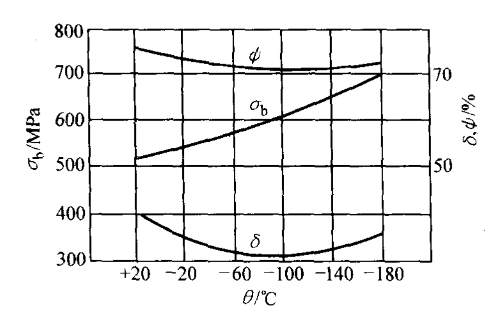


图 4.5-45 QSi3-1 拉伸性能在低温时的变化

5）剪切性能　QSi3-1 硅青铜抗剪强度见表 4.5-61。

6）耐磨性能　见表 4.5-62。

7）持久和蠕变性能　QSi3-1 硅青铜高温蠕变性能见表 4.5-63 和表 4.5-64，室温应力松弛见图 4.5-46。

表 4.5-61 不同状态 QSi3-1 的抗剪强度

状态	M	Y_2	Y	T
τ/MPa	295	345	395	425

表 4.5-62 不同状态 QSi3-1 的耐磨性能

状　态	摩擦因数 μ	
	有润滑剂	无润滑剂
Y 态棒材	0.015	0.4
M，Y 态线材	0.013	0.4

表4.5-63　QSi3-1硅青铜的蠕变性能

材料状态	试验温度/℃	在1 000 h产生下列残余变形值的应力/MPa	
		0.01%	0.10%
拉制棒材，600℃退火（119 HB，σ_b = 490 MPa，δ = 52%）	200	56	105
	290	26	45
拉制棒材，550℃退火1 h	200	72	155

表4.5-64　不同状态QSi3-1的高温蠕变性能

状态	θ/℃	$\sigma_{0.01/1\,000}$/MPa	$\sigma_{0.1/1\,000}$/MPa
退火棒材	148	159	199
	260	12	29
	204	34	103

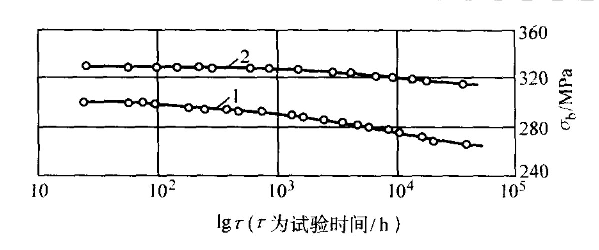


图4.5-46　QSi3-1硅青铜在20℃时的应力松弛
1—加工率60%的材料；2—在275℃退火1 h后的材料，退火前的冷加率为60%

8）疲劳性能　循环次数 $N = 10^7$ 周时，QSi3-1硅青铜带材不同状态下及低温退火后的弯曲疲劳强度极限见表4.5-65；不同状态下材料的疲劳弯曲曲线见图4.5-47。

表4.5-65　不同状态QSi3-1弯曲疲劳强度极限

状态	Y_2	Y	T	备注
σ_D/MPa	250	265	400	
	260	360	440	经275℃，1h退火

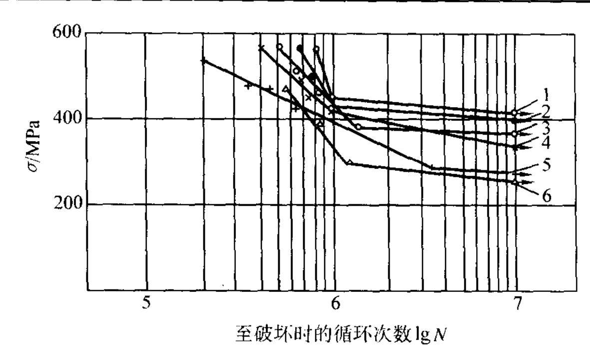


图4.5-47　各种状态QSi3-1的疲劳强度
1—T+低温退火；2—T；3—Y+低温火；4—Y；
5—Y_2+低温退火；6—Y_2

9）弹性性能　QSi3-1硅青铜弹性模量见表4.5-66，规定非比例伸长应力见表4.5-67。

4.5　工艺性能

1）熔炼与铸造工艺　QSi3-1合金通常采用工频（有芯或无芯）或中频感应电炉熔炼。熔池用经煅烧的木炭覆盖。用烟灰覆盖下的半连续铸锭工艺浇注铸锭，铸造温度为1 180～1 220℃。

2）成形性能　QSi3-1合金有优良的冷、热加工性能、可以进行各种形式的成形加工，如弯曲、镦粗、热压、热锻、滚花、挤压和旋压等。

表4.5-66　不同状态QSi3-1弹性模量

品　种	棒　材		带　材				线　材	
状　态	拉制	Y（ε = 40%）	Y（ε = 40%），回火	Y（ε = 60%）	Y（ε = 60%），回火	M	Y（50%）
E/GPa	104	113	118	112	118	105	120

表4.5-67　不同状态规定非比例伸长应力值

状态（ε/%）	$\sigma_{p0.002}$/MPa	$\sigma_{p0.005}$/MPa	$\sigma_{p0.01}$/MPa	状态（ε/%）	$\sigma_{p0.002}$/MPa	$\sigma_{p0.005}$/MPa	$\sigma_{p0.01}$/MPa
M	—	235	—	Y+275℃，1 h退火	485	540	580
Y（80）	325	400	—	Y+400℃，1 min退火	390	500	—

3）焊接性能　QSi3-1合金有良好的焊接性。易于铜焊、气体保护电弧焊、点焊、喷射焊、闪光焊，也能进行气焊，易于同其他青铜或钢熔焊。

4）切削加工与磨削性能　QSi3-1合金的切削加工性为易切削黄铜HPb63-3的30%。

4.6　选材与应用实例

QSi3-1硅青铜是大批量生产和使用的无锡青铜弹性材料，用途广泛，其主要的品种规格与供应状态见表4.5-68。

该合金基本特性为：具有高的强度和弹性，塑性好，且在低温下不降低；耐磨性好，热处理效果弱，通常在退火或加工硬化状态下使用，能很好地与其他青铜、钢和其他合金焊接，易于钎焊，碰击时不生火花，抗大气、淡水和海水腐蚀。

典型用途包括：各种弹性元件和在腐蚀条件下工作的零件以及蜗轮、蜗杆、齿轮、衬套、制动销和杆等耐磨零件。航空工业主要用作弹性元件和高强度的小型结构零件，如组合空速表，升降速度表和高度表的撑、杆、轴、弹簧环等。强烈的冷变形导致材料弹性性能的各向异性。用作弹性元件时，应注意取材的方向和对元件进行低温退火。

表4.5-68　QSi3-1品种规格与供应状态

品　种	带　材	板　材	棒　材		线　材
δ 或 d/mm	0.05～1.2	0.5～10	5～40	20～160	0.1～6.0
供应状态	M、Y、T	M、Y、T	Y	R	Y

9

5 铜镍锡与铜镍铝合金

铜镍锡与铜镍铝是以铜-镍合金为基础分别加入第三元素锡、铝的白铜，具有优良的耐蚀性和中等以上的强度，弹性好，易于热、冷压力加工，易于焊接，被广泛用于制造耐蚀的结构件和弹簧、插接件等。

铜与镍能形成无限互溶的连续固溶体（面心立方晶格），固态合金在322℃以下的温度范围内，存在一个产生亚稳分解的较宽成分－温度区域，添加锡、铝到铜-镍合金之后，将改变亚稳分解的成分-温度区域的大小和位置，并可借亚稳分解来改善性能。锡在铜-镍合金固溶体中的溶解度不大，且随着温度的下降而减小。在含锡量超过固溶度的铜-镍-锡合金中，会出现一种新的θ相，它是一种可溶解铜原子的Ni_3Sn化合物，即（Cu、Ni）$_3$Sn。铜-镍-锡合金可因θ相的沉淀而产生明显的强化效应，这类合金经冷加工后再时效，可获得很高的强度、硬度及优良的弹性性能，同时又有较好的抗氧化性和耐蚀性，易于焊接等优点。Cu-15Ni-8Sn合金是Spinodal调幅分解型高强度导电弹性合金，具有高温抗松弛特性，且无污染，是替代经典Cu-Be弹性合金的理想材料。

铝在铜-镍合金中的固溶度较低，并随着温度的下降而减小。Cu-Ni-Al合金中会产生Ni_3Al化合物（θ相或α_1相），有明显的沉淀硬化作用，提高合金的强度和硬度。此外，铝还能显著提高合金的耐蚀性，但使合金的冷加工性能变差。在铜-镍-铝系中加入适量锰（约5%）可提高合金的塑性。铜-镍-铝合金中的镍、铝含量之比，对合金力学性能有明显影响，当镍/铝比为8～10时，具有最佳的综合性能。铝白铜的力学性能和导热性都高于B30，其耐蚀性与B30接近。

含30%Ni、2.4%Al及0.47%Be的铜镍合金，可借化合物NiBe和Ni_3Al的沉淀而硬化，耐蚀性也很好。NiBe的沉淀导致前阶段的硬化；Ni_3Al的沉淀导致后阶段的硬化。该合金在1 050℃固溶处理后，冷加工50%，在400～500℃时效1 h，可获得优良的弹性性能（弹性极限达1 250 MPa），可与铍青铜（1.9%～2.15%Be，0.25%～0.35%Co）相比，而且耐热性能和压力加工性能优于铍青铜。

根据美国ASTM标准，铜镍锡的牌号有C72500（Cu-9.5Ni-23Sn），C72600（Cu-4Ni-4Sn），C72650（Cu-7.5Ni-5Sn），C72700（Cu-9Ni-6Sn），C72800（Cu-10Ni-8Sn），C72900（Cu-15Ni-8Sn），日本三菱C7250W。

根据中国GB标准，铜镍铝的牌号有BAl13-3，BAl6-1.5。

5.1 化学成分

部分铜镍锡与铜镍铝合金的化学成分见表4.5-69。

5.2 物理及化学性能

1）物理性能　部分铜镍锡与铜镍铝合金的物理性能见表4.5-70和图4.5-48。

表4.5-69　部分铜镍锡与铜镍铝的化学成分　%

合金	Cu	Ni + Co	Sn	Al	Fe	Mn	Pb	P	Zn	杂质总和
C72500	余量	Ni：8.5～10.5	1.8～2.8	—	≤0.6	≤0.2	≤0.05	—	≤0.5	≤0.2
C72900	余量	Ni：14.5～15.5	7.5～8.5	—	≤0.5	0.05～0.3	—	—	≤0.5	≤0.5
C72650	余量	Ni：7.0～8.0	4.5～5.5	—	—	—	—	—	—	≤0.5
BAl 6-1.5	余量	5.50～6.50	—	1.2～1.8	0.5	0.20	0.002	—	—	1.10
BAl 13-3	余量	12.00～15.00	—	2.3～3.0	1.0	0.50	0.002	0.01	—	1.90

表4.5-70　铜镍锡与铜镍铝的物理性能

合　金	液相线温度/℃	固相线温度/℃	线胀系数（200～300℃）$/10^{-6}K^{-1}$	比热容（20℃）$/J\cdot(kg\cdot K)^{-1}$	热导率（20℃）$/W\cdot(m\cdot K)^{-1}$	电导率（20℃）/%IACS	电阻率（20℃）$/\mu\Omega\cdot m$	密度（20℃）$/g\cdot cm^{-3}$	颜　色
C72500（Cu-9.5Ni-2.3Sn）	1 130	1 060	16.5	—	55	11	0.157	8.89	银白色
Cu-12Ni-8Sn	1 064～1 079	—	—	—	—	11.05	0.175	8.96	—
C72900（Cu-15Ni-8Sn）	—	—	—	—	—	7.88	0.225	8.94	—
BAl6-1.5	1 141.6	—	—	—	37.4	—	—	8.70	—
BAl13-3	1 184.7	—	—	—		—	—	8.50	—

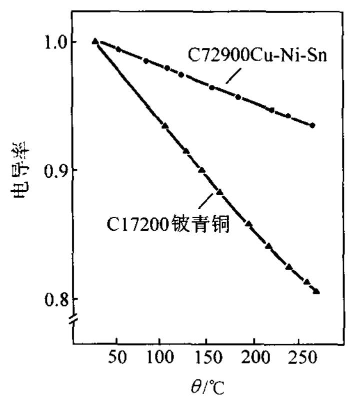


图4.5-48　C72900与C17200电导率与温度的关系
（规定室温下电导率为1）

2）化学性能　铜镍锡与铜镍铝合金的耐蚀性很好，优于铜和镍，适用作高强耐蚀件，室温下，在卤素和二氧化碳中无腐蚀。随着温度的升高和湿度的增大，腐蚀速度显著加快。在碱性盐溶液和有机化合物溶液中，腐蚀速度较小，在熔融金属（锡、铅、锌、铝、焊料等）中腐蚀很快。

5.3 热加工及热处理规范

退火温度650～800℃（C72500）；热加工温度850～950℃（C72500）。

5.4 力学性能

1）技术标准规定的力学性能　GB/T 2040—2002规定的用于制造各种高强度零件和重要用途的弹簧的铝白铜板的力学性能见表4.5-71。

表 4.5-71　铝白铜板材的力学性能

牌号	状态	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%
		≥	
BAl13-3	Y	539	3
BAl6-1.5	CS（热处理）	637	5

2）典型的力学性能见表 4.5-72～表 4.5-75。

3）硬度见图 4.5-49～图 4.5-52。

4）拉伸性能

① 加工率对力学性能的影响见图 4.5-53，图 4.5-54。

② 高温及低温力学性能见图 4.5-55～图 4.5-57，表 4.5-76。

表 4.5-72　C72500 白铜的典型力学性能

状　态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度/MPa			标距 50 mm 的伸长率 δ/%	硬度 HRB
		范围	载荷下延伸 0.5%	残余变形 0.2%		
退火①	380	125～172	150	150	35	42
1/4 硬	450	—	365	400	18	71
半硬	490	407～538	450	475	6	78
冷硬	570	503～607	515	555	3	85
超硬	600	—	555	590	2	88
弹性	625	572～670	570	620	1	90
超弹性	770	607～703	570	740	1	99
线材，直径 2 mm 退火①	415	—	170	—	—	—

① 晶粒度 0.015 mm。

表 4.5-73　部分铜-镍-锡合金的力学性能

合　金	固溶处理后的加工率/%	时效温度 θ/℃	时效时间 t/s	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.01}$/MPa	弹性极限 σ_c/MPa	伸长率 δ/%	备　注
Cu-5%Ni-5%Sn	99	350	60	1 300	1 020	—	—	ϕ0.5 mm 线材
Cu-7%Ni-8%Sn	99	425	8	1 500	1 220	—	—	
Cu-9%Ni-6%Sn	99	350	120	1 430	1 225	—	—	
Cu-12%Ni-8%Sn	99	400	10	1 600	1 350	—	—	
Cu-14%Ni-6%Sn	99	350	300	1 450	1 240	—	—	
Cu-20%Ni-5.2%Sn	50	400	3 600	1 030	—	920	4.1	厚 0.5 mm 带材
Cu-20%Ni-7.8%Sn	50	400	3 600	1 290	—	1 250	1.3	

表 4.5-74　部分铝白铜典型的力学性能

性　能	合　金		备　注
	BAl13-3	BAl 6-1.5	
抗拉强度 σ_b/MPa	380 900～950	360 650～750	软态 硬态
伸长率 δ/%	13 5	28 7	软态 硬态
屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	—	80	软态
布氏硬度 HB	260	210	

表 4.5-75　C72900（Cu-15Ni-8Sn）的屈服强度和成形性比值 R/t

合金及状态		$\sigma_{0.2}$/MPa	纵向 R/t (90°弯曲)①	横向 R/t (90°弯曲)②
C72900				
固溶处理和硬化	TF 00	415～203③	—	—
固溶处理、轧制和硬化	TH 02	725～883③	—	—
	TH 04	895～1 048③	1.0	4.0
轧制硬化	TM 00	517～655④	0	0
	TM 04	725～860⑤	0.5	1.0

① 纵向弯曲的弯曲轴线垂直于轧制方向，R 为弯枕半径，t 为料厚。

② 横向弯曲的弯曲轴线平行于轧制方向，R 为弯枕半径，d 为料厚。

③ 残余变形为 0.5%时的屈服强度。

④ 105℃经 1 000 h 后 0.2%屈服强度保留 93%。

⑤ 105℃经 1 000 h 后屈服强度保留 94%。

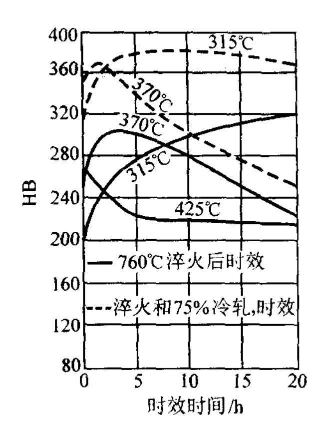


图 4.5-49　Cu-7.5%Ni-8%Sn 合金时效时硬度的变化

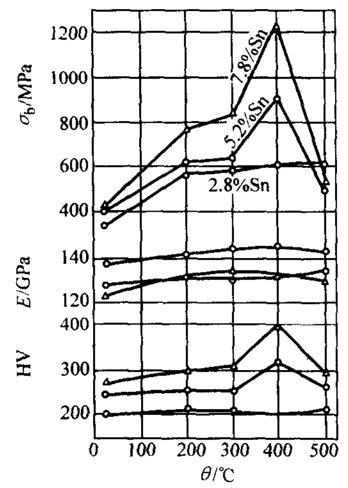


图 4.5-50　Cu-20%Ni-Sn 合金的力学性能与时效温度的关系加工率 50%，时效 1 h

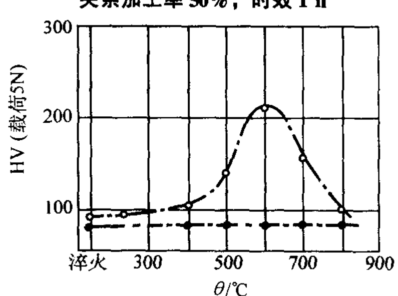


图 4.5-51　Cu-Ni-Al 合金的硬度与时效温度的关系

合金在 1 050℃水淬后，在各温度下时效 1 h

○—·—·—○Cu-30%Ni-2.4%Al;

●—·—·—●Cu-30%Ni-0.6%Al

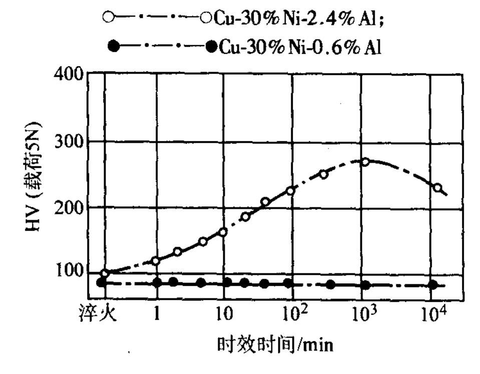


图 4.5-52　Cu-Ni-Al 合金的硬度与时效时间的关系

合金在 1 050℃水淬后，在 600℃时效

○—·—·—○Cu-30%Ni-2.4%Al;

●—·—·—●Cu-30%Ni-0.6%Al

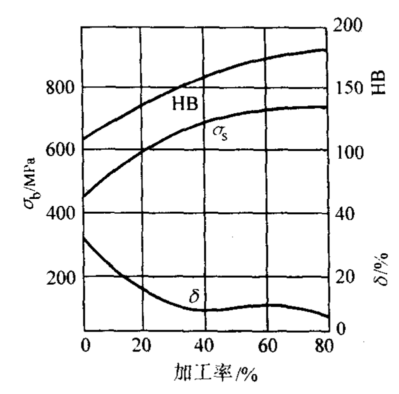


图 4.5-53　BAl6-1.5 的力学性能与加工率的关系

原材料：热轧条材

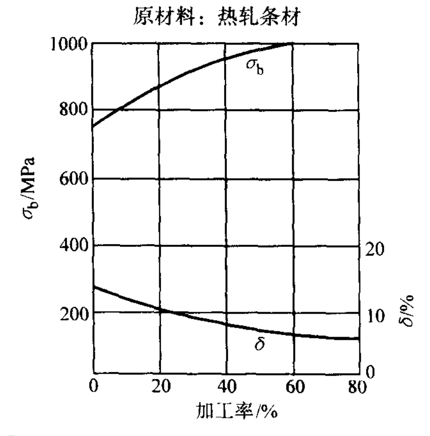


图 4.5-54　BAl13-3 的力学性能与加工率的关系

原材料：热轧条材

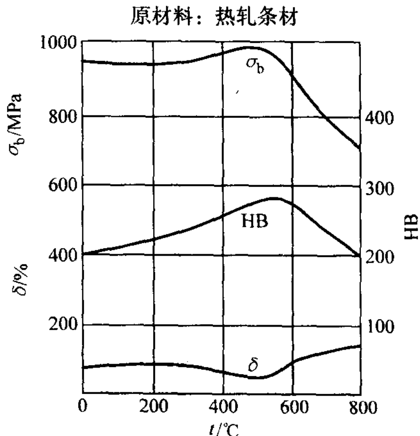


图 4.5-55　BAl13-3 的力学性能与退火温度（保温 1 h）的关系

原材料：加工率 40%的条材

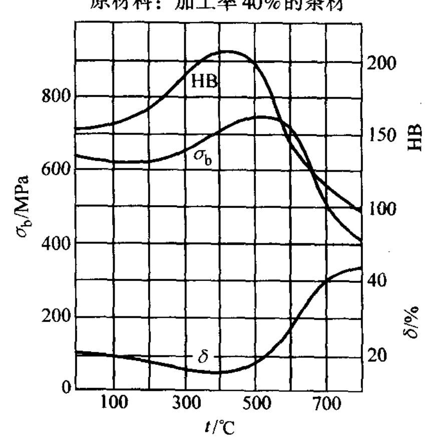


图 4.5-56　BAl16-1.5 的力学性能与退火温度（保温 1 h）的关系

原材料：厚 3 mm，加工率 40%的条材

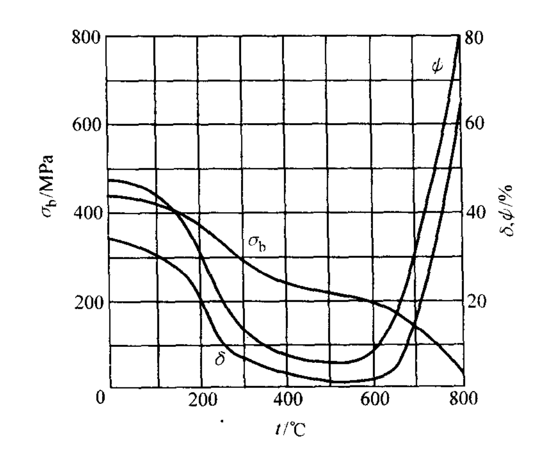


图 4.5-57　BAl16-1.5 的高温力学性能

表 4.5-76　BAl6-1.5 的低温力学性能

合金状态	温度/℃	性　能			
		抗拉强度 σ_b/MPa	屈服点 σ_s/MPa	伸长率 δ/%	断面收缩率 ψ/%
600℃淬火，550℃时效 2 h	20	638	—	24	50
	-10	701	385	22	48
	-40	726	432	25	57
	-80	706	361	23	57
	-120	755	444	26	63
	-180	750	385	26	67

5）抗应力松弛性能见图 4.5-58 和图 4.5-59。

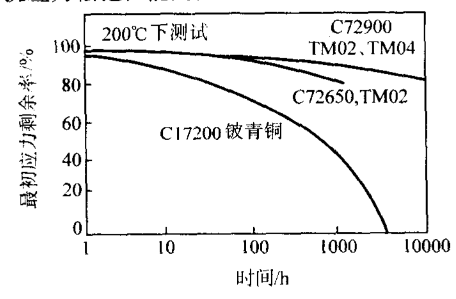


图 4.5-58　几种合金 200℃的应力松弛曲线

6）弹性性能　C72500 合金的弹性模量为 130 ~ 137 GPa，切变模量为 52 GPa；C72900（Cu-15Ni-8Sn）的弹性模量为 128 GPa，Cu-12Ni-8Sn 合金的弹性模量为 125 GPa。

5.5　工艺性能

1）成形性能　C72500 冷热加工成形性优，可冲切、造币、拉拔、成形、弯曲、镦锻、顶锻、滚上、滚花、剪切、旋锻、挤压、冲压和模锻等。

2）焊接性能　软、硬钎焊、电阻点焊、电阻对焊优；气体保护弧焊、保护金属弧焊良；氧乙炔焊中。

3）切削加工与磨削性能　C72500 的切削加工性为易切削黄铜（C36000 HPb63-3）的 20%。

5.6　选材与应用实例

铜镍锡与铜镍铝合金具有优良的耐热、耐腐蚀性和焊接性等特点，是很有发展前途的高导电弹性合金。如 Cu-Ni-Sn 合金生产成本低，无毒且具有较高的热稳定性和高温强度可用于替代铍青铜制造精密仪器、仪表的弹性元件。其中 C72900（Cu-15Ni-8Sn）在高温下具有优良的抗应力松弛性能，被视为高温电连接器中接插件的理想材料。

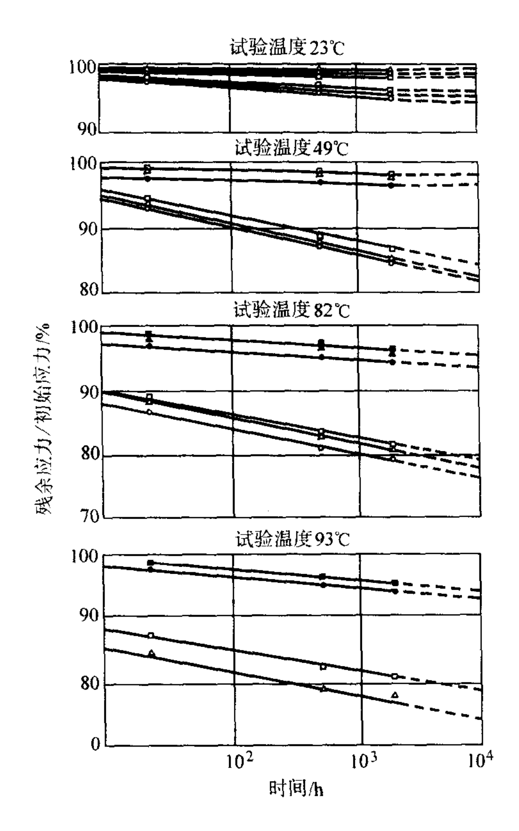


图 4.5-59　强烈冷轧（98.7%变形率）的 C72500 合金的弯曲应力松弛性能的各向异性

材料：厚 0.25 mm 带材，357℃退火 2 h

试样方向：－•－　平行轧制方向

－▵－　与轧制方向成 45°；－▫－　垂直于轧制方向

空心符号表示轧制材料，实心符号表示退火材料

初始应力：轧制状态，平行方向 524 MPa；

轧制状态 45°方向 510 MPa；轧制状态，垂直方向 586 MPa；

退火状态，平行方向 559 MPa；退火状态，45°方向 552 MPa；

退火状态，垂直方向 710 MPa

6　钛青铜

工业钛青铜除主要合金元素铜、钛外，还含有一定的铁、锡、铬、铝等元素。这类材料具有高的强度、硬度、弹性极限和优良的耐磨性、耐疲劳性、耐热性及耐蚀性，冷热态加工性好，易钎焊和电镀，无磁性，冲击时不生火花，导电性仅次于铍青铜，可用于制造高强度、高弹性、高耐磨性的零件。

铜-钛合金中添加 0.35%以上的锡，就会在组织中形成新的第二相——TiSn。TiSn 相的数量随合金中含钛量和含锡量的增加而增多。锡在 Cu-1.6%Ti 合金中的固溶度随着温度的降低而明显减少，并可借 TiSn 相的析出而导致合金硬化。Cu-1.6%Ti-2.5%Sn 合金具有最佳的沉淀硬化效果，该合金的加工性能好，在 900℃淬火后不经中间退火也可冷加工 90%。合金冷加工后在 400℃时效具有最高的强度，其电导率在 30%以上，是一种良好的高强度、中等电导率的材料。

铁能使二元铜-钛合金固溶处理后的硬度降低，塑性增高，能显著阻止加热时的晶粒长大，抑制时效过程中的晶界反应，还能与钛形成金属间化合物，提高合金的耐磨性。加工用 Cu-4.0% ~ 6.0%Ti 合金中以加入 0.5% ~ 0.7%Fe 为宜，过多会降低时效后的硬度。

镍与钛能形成化合物 Ni_3Ti 固溶于铜，而且溶解度是随温度降低而减小。Cu-Ti-Ni 合金中镍与钛质量比接近于 3.68 时，可获得明显的沉淀硬化效果。例如，Cu-0.58% Ti-

2.06%Ni 合金中的镍与钛的质量比为3.55，该合金经950℃固溶处理1 h和600℃时效1 h后，其抗拉强度可提高到600 MPa，伸长率为10%，维氏硬度为180HV，电导率为60%，而且耐热性也很好（开始软化温度大约为650℃）。

Cu-Ti合金中加入少量硼、锆、铬，可阻碍加热时的晶粒长大，细化晶粒；降低合金固溶处理后的硬度，使冷加工性能得到改善；抑制晶界反应；提高合金时效后的强度、弹性极限及高温强度；还使Cu-4%Ti合金过时效趋势减缓，性能稳定性提高。少量铬加入到Cu-Ti-Sn合金中，可进一步提高合金的力学性能。Cu-1.5%Ti-2.5%Sn-0.4%Cr合金能冷、热态压力加工，经淬火、冷加工及时效处理后具有高的强度、中等电导率和好的高温性能。

少量铝可提高Cu-Ni-Ti合金的抗氧化性，其耐热性超过二元Cu-Cr合金。Cu-2%Ni-0.6%Ti-0.2%Al合金是一种电导率可达50%~60%的良好耐热导电材料。Cu-6%Ti合金中加入0.5%~1.0%Al，能提高强度和硬度，也提高耐蚀性。

常见钛青铜的牌号有：3.5钛青铜（QTi3.5），3.5-0.2钛青铜（QTi3.5-0.2），6-1钛青铜（QTi6-1）。

6.1 化学成分（见表4.5-77）

表4.5-77 加工钛青铜的化学成分

合金	化学成分（质量分数）/%			
	主成分			杂质总和≤
	Ti	Cr	Cu	
QTi3.5	3.5~4.0	—	余量	0.5
QTi3.5-0.2	3.5~4.0	0.15~0.25	余量	0.5
QTi6-1	5.8~6.1	Al0.5~1.0	余量	0.5

6.2 物理及化学性能

1）物理性能　密度：8.59 g/cm³（QTi3.5），8.4 g/cm³（QTi6-1）；线胀系数（0~300℃）：1.66×10^{-5} K^{-1}（QTi3.5），1.504×10^{-5} K^{-1}（QTi6-1）；电导率：13%~18% IACS（QTi3.5）；QTi3.5的电导率与时效温度的关系见图4.5-60；电阻率：0.12~0.57 μΩ·m（QTi3.5），0.097 μΩ·m（QTi6-1）。

2）化学性能　加工钛青铜的耐蚀性列于表4.5-78和表4.5-79。钛青铜在稀硫酸、硝酸和稀盐酸中均有较好的耐蚀性，QTi6-1在海水中的耐蚀性优于铍青铜。

表4.5-78 钛青铜与铍青铜的耐蚀性比较（一）

合金成分	耐蚀性/mg·$(m^2\cdot d)^{-1}$				
	在蒸馏水中	在1%硫酸液中	在1%硝酸液中	在海水中	在大气中
Cu-4.8%Ti	0.40	66.16	39.16	6.32	74.0
QBe2	0.40	74.24	386.20	2.48	1.09

表4.5-79 钛青铜与铍青铜的耐蚀性比较（二）

腐蚀介质	耐蚀速度/mm·a^{-1}		
	Cu-6.0%Ti-1.0%Al	Cu-6.0%Ti	QBe1.9
10%氯化钠水溶液	0.023 1	0.058 6	0.045 2
10%盐酸水溶液	0.286 9	0.651 6	0.319 3

6.3 热加工及热处理规范（见表4.5-80）

6.4 力学性能（表4.5-81~表4.5-83和图4.5-61~图4.5-63）

表4.5-80 钛青铜热加工及热处理规范

合金	热加工温度/℃	固溶处理温度/℃	时效温度/℃	再结晶退火温度/℃
QTi3.5，QTi3.5-0.2	850~800	850~900	400~450	500~600
QTi6-1	850~800	800~850	350~400	—

表4.5-81 加工钛青铜的室温力学性能

合金代号	状　态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	硬度 HV	纵向弹性模量 E/GPa
QTi3.5-0.2（1 mm板材）	冷加工60%的	750~800	700~720	3.5~4.0	230~250	—
	850℃淬火的	400~420	200~250	35~42	150~90	—
	400℃时效2 h的	1 000~1 050	950~980	7.0~9.0	350~360	—
QTi3.5（1 mm板材）	冷加工60%的	700~750	650~700	2.5~3.5	220~228	—
	850℃淬火的	400~450	250~270	30~35	120~130	—
	400℃时效2~3 h的	650~750	450~500	24~28	210~215	—
QTi3.5（0.35 mm带材）	冷加工50%的	700~750	600~650	3.0~4.0	230~240	125
	850℃淬火的	380~420	250~300	15~25	—	—
	400℃时效5 h的	380~700	500~550	15~25	220~230	118
QTi3.5（0.15 mm带材）	冷加工50%的	800~850	—	4.0~4.5	—	—
	850℃淬火的	300~350	—	15~20	—	—
	400℃时效2 h的	850~900	—	10~12	—	—
QTi6-1	850℃淬火的	470~510	—	40~41	140	—
	冷加工的	900~1 080	—	1.5~3.5	297	—
	淬火时效的①	1 020	—	6.0	257	121
	冷加工后时效的	1 300	—	4.0	461	130

① 800~850℃淬火，350~400℃时效2~3 h。

表 4.5-82　加工钛青铜的高温力学性能

合　金	状　态	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%
QT3.5-0.2（铸造试样）	常温（20℃）	550～600	6.0～9.0
	850℃瞬时拉伸	55～80	45～80
	900℃瞬时拉伸	20～36	2.4～3.2
QTi3.5（铸造试样）	常温（20℃）	550～600	8.0～13
	850℃瞬时拉伸	50～60	64～66
	900℃瞬时拉伸	20～40	4.0～16

表 4.5-83　部分不同处理态钛青铜的力学性能

性　能	Cu-1.5%Ti-2.5%Sn-0.5Cr			Cu-4.22%Ti-0.69%Fe-0.1%Zr		
	850℃淬火	淬火后在450℃时效6～8 h	淬火后冷加再在450℃时效6～8 h	在870℃加热10 min淬火	500℃时效1 h	500℃时效10 h
抗拉强度 σ_b/MPa	—	632.8～703.1	689.0～808.6	557	938	—
屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	—	527.3～597.6	—	—	—	—
屈服强度 $\sigma_{0.1}$/MPa	—	492.2～562.5	597.6～667.9	—	—	—
伸长率 δ/%	35～40	13～17	7～12	27.2	17.8	—
断面收缩率 ψ/%	—	37	—	—	—	—
维氏硬度 HV	80	200～210	230～250	140	294	305
洛氏硬度 HRB	20～30	90	67～75 HRG	—	—	—
弹性模量 E/GPa	—	>126.6	—	—	119.3	—
比例极限 σ_p/MPa	—	316.4～421.9	386.7～527.3	—	727①	—

①　弹性极限 σ_e。

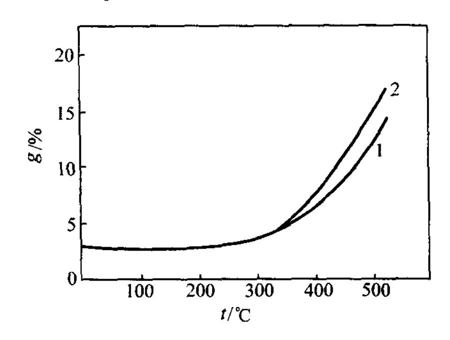


图 4.5-60　QTi3.5 的导电率与时效温度的关系
合金在各温度时效 1 h
1—淬火后；2—淬火后并冷加工 50%

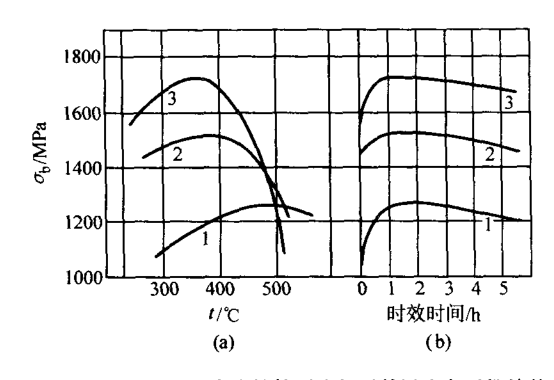


图 4.5-61　Cu-4.1%Ti 合金抗拉强度与时效温度和时间的关系
（a）合金在不同温度时效 1.5 h：1—未加工的；
2—加工 50%的；3—加工 85%的
（b）1—未加工的，在 500℃时效；2—加工 50%的，
在 400℃时效；3—加工 85%的，在 375℃时效

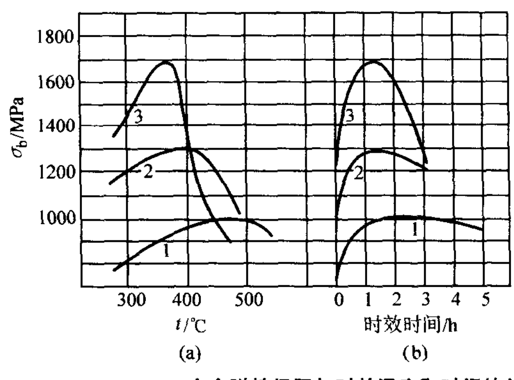


图 4.5-62　Cu-4.1%Ti 合金弹性极限与时效温度和时间的关系
（a）合金在不同温度时效 1.5 h：1—未加工的；
2—加工 50%的；3—加工 85%的
（b）1—未加工的，在 500℃时效；2—加工 50%的，
在 400℃时效；3—加工 85%的，在 375℃时效

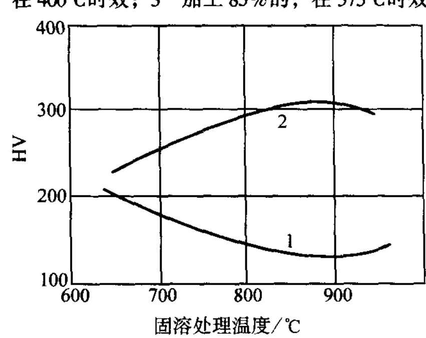


图 4.5-63　QTi3.5 的硬度与固溶处理温度的关系
原材料：厚 1 mm 板材
1—在各温度保温 20 min，水淬；2—固溶处理后在 450℃时效 1 h

6.5 工艺性能

工业钛青铜具有优良的耐磨性和焊接性，能够冷、热态压力加工。

6.6 选材和应用实例

QTi3.5、QTi3.5-0.2 合金具有高的强度、硬度和弹性；电导率仅次于铍青铜；有优良的耐磨性、耐疲劳性、耐热性和耐蚀性；碰击时不生火花；无磁性；易软钎焊和电镀，是一类高强度、导电弹性材料。主要用做高强度、高弹性、高耐磨性的各种元件，如电器开关、继电器的弹性元件、真空管插座、各种控制系统的弹簧、接插元件、膜盒、膜片、精密小型齿轮以及各种轴承等。制品种类包括板、带、管、棒、线。

QTi6-1 合金具有高的强度、硬度、弹性，高温性能优于铍青铜，耐蚀性好，但导电性低于铍青铜，可代替铍青铜作精密仪器和仪表的弹性元件，如振动变流器的振动片、膜片、超高频标准器的接触弹性元件、行程开关弹片等。制品种类主要为板、带。

编写：李百治（西北稀有金属材料研究院）
曹玲飞（中南大学）
汪明朴（中南大学）
李　周（中南大学）
审稿：唐仁政（中南大学）

第6章 高强度热稳定铜合金

1 铝青铜

具有高强度热稳定性的铝青铜通常为复杂铝青铜，即除铝外，还含有铁、镍、锰等其他元素的多元合金。这类铝青铜有高的力学性能，强的热稳定性。元素锰可提高合金的力学性能和耐蚀性，使其能很好地承受冷、热压力加工，如加入0.3%～0.5%的锰，就可以减少热轧开裂，提高成品率。元素铁能细化铝青铜铸造或再结晶后的晶粒，与铝形成微粒状的$FeAl_3$化合物，显著提高合金的强度、硬度和耐磨性，但铁含量过高时，组织中会析出针状$FeAl_3$化合物，降低合金力学性能，铁还能增加高温β相的稳定性，抑制β相共析分解及形成连续链状的粗大γ_2颗粒而使合金变脆的"自行退火"现象。元素镍既提高铝青铜共析转变温度，又使共析点成分向高铝方向移动，并可改变α相的形状。含镍量较低时，α相呈针状，含镍量达3%时则呈片状。在含镍铝青铜中加入锰，有使β相的共析转变形成粒状组织的倾向。镍显著提高铝青铜的强度、硬度、热稳定性和耐蚀性。

1.1 铝青铜 QAl9-2

(1) 牌号、品种规格与供应状态

材料牌号：QA1 9-2。

相近牌号：БРАМц9-2（俄罗斯），CuA19Mn2（德国），CuA19Mn2（ISO）。

品种规格与供应状态见表4.6-1。

表4.6-1 QA19-2的品种规格与供应状态

品 种	板 材	带 材	管 材	棒 材
d、δ或$D\times S$/mm	0.4～12.0	0.05～1.20	20～250×3～50	10～160
供应状态	Y M	M Y T	R	R

(2) 化学成分（表4.6-2）

表4.6-2 QA19-2的化学成分（质量分数） %

Al	Mn	Cu	Sn	Zn	Fe	Pb	Si	P	杂质总和
			≤						
8.0～10.0	1.5～2.5	余量	0.1	1.0	0.5	0.03	0.1	0.01	1.7

合金组织结构：铸锭金相组织为α相+（α+γ_2）共析体组织；冷轧态组织为α相和共析体，且α相已破碎；退火后组织为再结晶α相和共析体；挤压状态下为α基体和少量共析体加γ_2相。

(3) 物理及化学性能

1) 物理性能 密度：$\rho=7.6$ g/cm^3；熔化温度范围：液相线温度1 061℃；热导率$\lambda=71.2$ W/（m·K）；线胀系数：$\alpha=17.0\times10^{-6}K^{-1}$（20℃）；电阻率：$\rho=0.11$ μΩ·m。

2) 化学性能 抗氧化性能：合金在表面形成一层致密氧化膜，可防止高温氧化，其热稳定性较好。

耐腐蚀性能：合金具有优良的耐蚀性。在大气、海水及多数有机酸溶液中均有很高的耐蚀性。在某些硫酸盐、苛性碱、酒石酸等溶液中也有较好的耐蚀性。合金在海水中的腐蚀速度见表4.6-3。

表4.6-3 合金在海水中的腐蚀速度

介 质	腐蚀速度		备 注
	g/(m^2·h)	mm/a	
20℃人造海水	0.02	0.02	加工试样
40℃人造海水	0.03	0.03	加工试样

合金在某些介质中的腐蚀速度见表4.6-4。

(4) 热处理

中间退火：700～750℃（棒），540～700℃（板、带）。

(5) 力学性能

1) 技术标准规定的性能见表4.6-5。

表4.6-4 合金在其他介质中的腐蚀速度

腐蚀介质	试验温度/℃	试验持续时间/h	腐蚀速度	
			g/（m^2·h）	mm/a
30%乙酸溶液	20	720	0.03	0.03
30%乙酸溶液	40	720	0.24	0.28
铸造试样在10%盐酸溶液中	20	720	2.16	2.46
铸造试样在10%盐酸溶液中	40	720	5.14	5.86
压力加工试样在10%盐酸溶液中	20	720	1.31	1.50
压力加工试样在10%盐酸溶液中	40	720	6.28	7.16
浓硫酸	20	720	0.06	0.07
浓硫酸	40	720	0.31	0.36
20%硫酸铵溶液	20	720	0.03	0.03
40%硫酸铵溶液	40	720	0.05	0.054

表4.6-5 技术标准规定的性能

品 种	状 态	d或δ/mm	σ_b/MPa	δ/%	技术标准
			≥		
板 材	M Y	0.4～12.0	441 588	18 5	GB/T 2040—2002

续表 4.6-5

品种	状态	d 或 δ/mm	σ_b/MPa	δ/%	技术标准
			≥		
带材	M Y T	0.3~12.0	441 588 880	18 5 —	GB/T 2059—2000
管材	R	3~50（壁厚）	470	15	GB/T 1528—1997
棒材	R	10~45 >45~120	490 470	15 (δ_{10})，18 (δ_5) 20 (δ_{10})，14 (δ_5)	GB/T 13808—1992

2）硬度　供应状态材料硬度见表 4.6-6。

表 4.6-6　供应状态材料硬度

材料状态	铸铁模铸件	R	M	Y
HBS	90~120	160	80~100	160~180

材料硬度与退火温度的关系分别见图 4.6-1 和图 4.6-2。

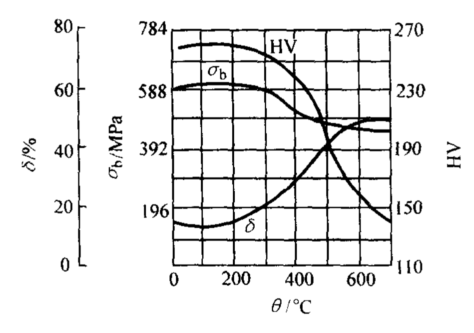


图 4.6-1　QA19-2 的力学性能与退火温度（保温 1 h）的关系

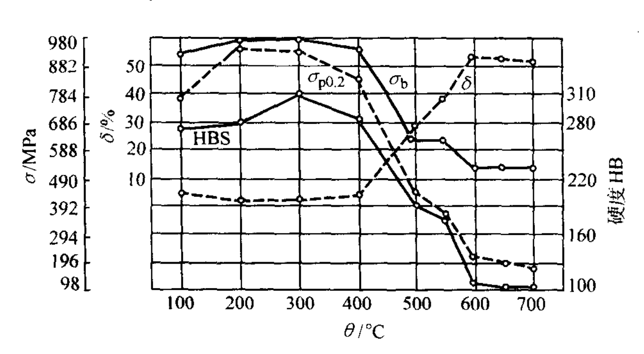


图 4.6-2　QA19-2 力学性能与退火温度的关系
原材料：2.5 mm 板材，加工率 50%，
在不同温度退火 30 min，纵向试样

材料硬度与加工率的关系见图 4.6-3。

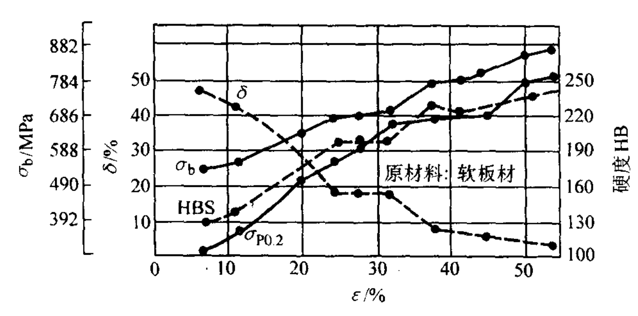


图 4.6-3　QA19-2 力学性能与加工率的关系

3）拉伸性能　供应状态材料的拉伸性能见表 4.6-7。材料的高温力学性能见表 4.6-8。

表 4.6-7　供应状态材料的拉伸性能

材料状态	σ_b/MPa	δ/%	ψ/%
R	392	25	—
M	441	20~40	35
Y	588~784	4~5	—

表 4.6-8　材料的高温力学性能

θ/℃	20	500	600	650	700	750	800	850
σ_b/MPa	412	176	88	39	15	10	8	4
δ/%	25	11	17	30	40	55	70	80

材料的力学性能与加工率的关系分别见图 4.6-3 和图 4.6-4。

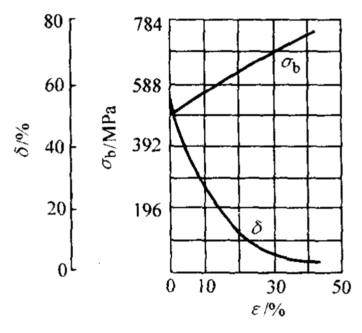


图 4.6-4　QA19-2 的力学性能与加工率的关系

4）冲击性能　冲击韧度 a_{KU} = 686 kJ/m^2（铁模铸造），a_{KU} = 882 kJ/m^2（M）。

5）摩擦性能　摩擦因数见表 4.6-9。

表 4.6-9　材料的摩擦因数

工艺条件	有润滑剂			无润滑剂		
材料状态	铸件	加工材		铸件	加工材	
	铁模铸造	挤制	软、硬态	铁模铸造	挤制	软、硬态
摩擦因数	0.006	0.006	0.006	0.18	0.18	0.18

6）疲劳性能　疲劳强度 σ_D = 205.8 MPa（循环周次 10^6 次，硬态材料）。

7）弹性性能　弹性模量 E = 90.2 GPa（铁模铸件）。

（6）工艺性能

1）熔炼和铸造工艺　合金一般在感应电炉中熔炼。铝与氧的亲和力较大，易形成致密的氧化膜 Al_2O_3，可不用脱氧剂、覆盖剂，但易形成氧化铝夹渣。熔炼温度不宜过高，避免或减少熔体搅动，捞渣要仔细，宜采用冰晶石清渣。铸造采用敞开式半连续铸造，铸造温度为 1 200~1 240℃。

2）成形性能　合金可良好地承受热态和冷态加工，热加工温度为740～840℃。

3）焊接性能　合金宜于进行电焊和气焊，不易钎焊。

4）切削加工及磨削性能　合金的切削加工性为20%（以HPb63-3为100%）。

（7）选用实例

合金一般用于制造高强度零件，如轴承、齿轮、衬套及其他高承力结构件。

1.2　铝青铜 QA19-4

（1）牌号、品种规格与供应状态

材料牌号：铝青铜QA19-4。

相近牌号：БРАЖ9-4（俄罗斯），C61900（美国），CA103（英国），CuAl8Fe（德国）。

品种规格与供应状态见表4.6-10。

表4.6-10　材料的品种规格与供应状态

品　种	挤制棒材	拉制棒材	带　材	板　材	管　材
d，δ或$D\times S$/mm	10～160	5～40	0.05～1.20	0.4～12.0	（20～250）×（3～50）
供应状态	R	Y	T	Y	R（热挤）

（2）化学成分（表4.6-11）

表4.6-11　材料的化学成分（质量分数）　%

Al	Fe	Cu	Zn	Mn	Pb	Si	P	Sn	杂质总和
			≤						
8.0～10.0	2.0～4.0	余量	1.0	0.5	0.01	0.1	0.01	0.1	1.7

合金组织结构：在高于β→（α+γ）共析转变温度（565℃）时，合金为（α+β）两相组织。快冷时β相通过无扩散相变变成β′马氏体相；低于共析转变温度回火，β′相共析分解为（α+γ_2），不同的回火制度能得到不同析出形态的共析体。合金中还存在微粒状的$FeAl_3$化合物。

（3）物理及化学性能

1）物理性能　密度：$\rho=7.50$ g/cm^3；熔化温度范围：1 037～1 048℃；热导率：$\lambda=58.6$ W/（m·K）；比热容：$c=376.3$ J/（kg·K）；线胀系数见表4.6-12；电导率：$g=10.5\%$IACS；电阻率：$\rho=0.123$ μΩ·m；磁性能：合金的磁导率$\mu=1.7$。

表4.6-12　料的线胀系数

θ/℃	20～300	-20	-40	-60	-100	-140	-180	-190
$\alpha/10^{-6}\cdot K^{-1}$	19.0	15.8	15.3	14.7	13.8	13.2	12.0	11.0

2）化学性能　抗氧化性能：抗高温氧化性能良好；耐腐蚀性能：合金在大气、淡水、静止和流动的海水中有稳定的耐蚀性，对非氧化性酸、盐酸、硫酸和乙酸等也有好的耐蚀性，但不宜在碱性溶液条件下使用。

（4）热处理

在650～700℃加热后，空冷，可以降低脆性。退火：600～700℃，1～4 h，空冷。消除应力退火：300～400℃，1 h。

（5）力学性能

1）技术标准规定的性能（见表4.6-13）。

表4.6-13　技术标准规定的性能

品　种	状　态	δ，d或$D\times S$/mm	σ_b/MPa	伸长率/%		HBS	技术标准
				δ_{10}	δ_5		
挤制棒材	R	10～120 >120～160	540 450	15 12	17 13	110～190	GB/T 13808—1992
挤制棒材	Y	5～40	580	12	13	—	GB/T 4423—1992
板　材	Y	0.4～12.0	588	—	—	—	GB/T 2040—2002
带　材	Y	0.3～1.20	637	—	—	—	GB/T 2059—2000
管　材	R	（20～250）×（3～50）	490	15	17	110～190	GB/T 1528—1997

2）硬度　挤制棒材经980℃淬火，不同温度回火后的硬度见表4.6-14。

表4.6-14　各种热处理后材料的硬度

回火温度/℃	300	400	500	600	700	未回火
HBS	187	158	161	156	166	170

挤制棒的高温和低温硬度见表4.6-15。

表4.6-15　挤制棒的高温和低温硬度

θ/℃	-196	600	700	800	900
HRB	98.4	26	7.6	4.0	1.1

3）拉伸性能　供应状态材料的室温拉伸性能见表4.6-16。

不同变形率材料的拉伸性能见图4.6-5。

不同温度退火后材料的拉伸性能见图4.6-6。

表4.6-16　供应状态材料的室温拉伸性能

品种	状态	σ_b/MPa		δ/%	
		min	max	min	max
棒材	R	540	686	18	41
管材	R	520	657	19	38

高温拉伸性能见图4.6-7。

低温拉伸性能见表4.6-17。

4）压缩性能　挤制棒的抗压强度$\sigma_{bc}=1\ 127$ MPa。

5）冲击性能　冲击韧度见表4.6-18。

6）扭转和剪切性能　挤压棒的抗剪强度$\tau=372$ MPa；挤压棒材的摩擦因数$\mu=0.012$（有润滑剂），$\mu=0.180$（无润滑剂）。

7）疲劳性能　挤压棒的疲劳强度极限：循环次数N为5×10^7周时，$\sigma_D=206$ MPa。

8）弹性性能　弹性模量$E=113.8$ GPa（R态棒材）；切变模量$G=41.4$ GPa（R态棒材）。

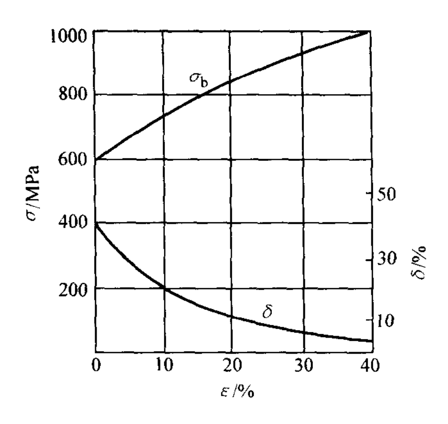


图 4.6-5　QAl9-4 拉伸性能与变形率的关系

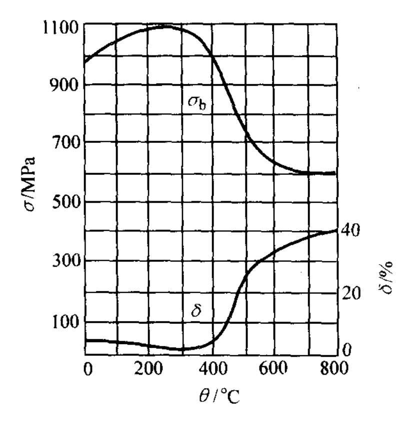


图 4.6-6　QAl9－4 拉伸性能与退火温度（保温 1 h）的关系

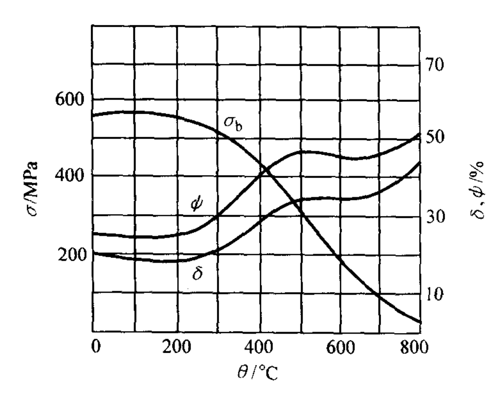


图 4.6-7　QAl9-4 的高温拉伸性能

表 4.6-17　材料的低温拉伸性能

状态	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	ψ/%
R(挤压)	－183	710	380	15	16
	－196	725	365	17	16
M(650℃,1 h 退火)	－183	670	315	25	25
	－196	715	345	27	25
M(700℃,1 h 退火)	－183	640	325	18	20
	－196	660	335	22	21
M(750℃,1 h 退火)	－183	610	330	14	13
	－196	650	340	18	16

表 4.6-18　材料的冲击韧性

状态	R(挤压)		M(650℃,1 h 退火)		M(700℃,1 h 退火)	
θ/℃	20	－196	20	－196	20	－196
a_{KU}/kJ·m^{-2}	304	147	402	256	392	256

（6）工艺性能

1）熔炼与铸造工艺　合金凝固温度范围小，流动性好，能得到致密的铸锭。元素铝易氧化生成高熔点的氧化铝，形成悬浮渣，难以清除，应使用能溶解氧化铝的冰晶石作为覆盖剂。当使用回炉料时，宜用六氯乙烷进行精炼。常用中频或工频无芯感应电炉熔炼和半连续铸造工艺浇注铸锭。铸造温度为 1 180～1 240℃。

2）成形性能　β 相在高温时富于塑性，因此合金有好的热加工性能，能进行热挤压，热轧和热锻。热锻率为锻造黄铜（美 C37700）的 80%。热加工温度为 750～850℃。合金还具有一定的冷加工性能，可进行冷轧、弯曲和成形加工。

3）焊接性能　合金能良好地进行氩弧焊、闪光焊，也可以进行铜焊，但不宜气焊、锡焊和电渣焊。

4）表面处理工艺　酸洗：采用硫酸＋重铬酸钠水溶液；光亮处理：采用磷酸（55%，体积分数）＋硝酸（20%，体积分数）＋乙酸（25%，体积分数）水溶液。于 50～80℃浸渍。

5）切削加工与磨削性能　合金的切削加工性为易切削黄铜 HPb63－3 的 30%。

（7）选用实例

该合金在航空制造工业中主要用于制造支架、接管嘴、轴承、衬套、法兰盘、导阀、齿轮、泵杆以及凸轮等结构零件。

1.3　铝青铜 QAl10-3-1.5

（1）牌号、品种规格与供应状态

材料牌号：铝青铜 QAl10-3-1.5。

相近牌号：表 4.6-19。

表 4.6-19　材料的国外相近牌号

国别	俄罗斯	德国	日本	美国	ISO
牌号	БРАЖМц10-3-1.5	CuAl10Fe	C6161	C61600	CuAl10Fe3

品种规格与供应状态见表 4.6-20。

表 4.6-20　材料的品种规格与供应状态

品　种	挤制棒材	拉制棒材	管　材
d 或 $D\times S$/mm	10～160	5～40	(20～50)×(3～50)
供应状态	R	Y	R(热挤)

（2）化学成分

QAl10-3-1.5 的化学成分见表 4.6-21。

表 4.6-21　材料的化学成分　%

Al	Fe	Mn	Cu	Pb	Si	P	Zn	杂质总和
				≤				
8.5～10.0	2.0～4.0	1.0～2.0	余量	0.03	0.1	0.01	0.5	0.75

合金组织结构：合金的显微组织结构随铸锭和挤压材料的冷却条件不同而有所变化。在生产条件下冷却为 α＋（α＋γ_2）共析体，若冷却过慢，则形成的（α＋γ_2）共析体有明显的片状特征，性能变脆；高温加热并快速冷却时，高温 β 相通过无扩散相变形成亚稳态的针状 β′马氏体；回火时 β′

共析分解成粗大的（$\alpha+\gamma_2$），或细小的（$\alpha+\gamma_2$）。可以通过改变回火制度调整共析体的析出形态，以得到所需的材料性能。

(3) 物理及化学性能

1）物理性能　密度：$\rho=7.50\ g/cm^3$；熔化温度范围：1 020～1 046℃；热导率：$\lambda=58.6\ W/(m\cdot K)$；比热容：$c=356J/(kg\cdot K)$；线胀系数见表4.6-22；电导率：$g=9.1\%IACS$；电阻率：$\rho=0.190\ \mu\Omega\cdot m$；磁性能：合金的磁导率 $\mu=1.39$。

表4.6-22　材料的线胀系数

θ/℃	20～40	20	-20	-60	-100	-120	-160	-196
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	20.0	16.0	15.9	15.1	14.5	14.2	13.6	12.0

2）化学性能　抗氧化性能：高温抗氧化性能好；耐腐蚀性能：合金在大气、淡水和海水中有高的耐蚀性。合金在不同介质中的腐蚀速度见表4.6-23。

表4.6-23　合金在不同介质中的腐蚀速度

介　质	θ/℃	腐蚀速度	
		g/（$m^2\cdot h$）	mm/a
人造海水	20	0.007	0.008
人造海水	40	0.012	0.013
30%乙酸溶液	20	0.03	0.03
30%乙酸溶液	40	0.104	0.12
10%硫酸溶液	20～80	<0.20	<0.20
35%硫酸溶液	80	0.404	0.45
浓硫酸	20	0.03	0.033
浓硫酸	40	0.166	0.190

(4) 热处理

淬火和回火：850℃，水淬，350～450℃，1～2 h回火。退火：650～750℃。

(5) 力学性能

1）技术标准规定的性能见表4.6-24。

表4.6-24　技术标准规定的性能

品　种	状　态	d/mm	σ_b/MPa	伸长率/%		HBS	技术标准
				δ_{10}	δ_5		
			≥				
挤制棒材	R	10～16 >16～160	610 590	8 12	9 13	130～190	GB/T 13808—1992
拉制棒材	Y	5～40	630	6	8	—	GB/T 4423—1992
挤制管材	R	壁厚 S<20 壁厚 S≥20	590 540	12 17	14 15	140～200 135～200	GB/T 1528—1997

2）硬度　供应状态材料的硬度见表4.6-25。

表4.6-25　供应状态材料的硬度

品种	状态	HBS	
		min	max
管材	R	161	179
棒材	R	146	208

不同条件热处理后棒材的硬度见表4.6-26。

表4.6-26　不同条件热处理后棒材的硬度

热处理制度		HRB	热处理制度		HRB
退火温度/℃	时间/h		淬火/℃	回火	
600	1 h，炉冷	92.6	850	300℃，1 h，空冷	94.0
650		83.4		350℃，1 h，空冷	95.0
750		76.8		450℃，1 h，空冷	90.0

不同温度退火后材料的硬度见图4.6-8。

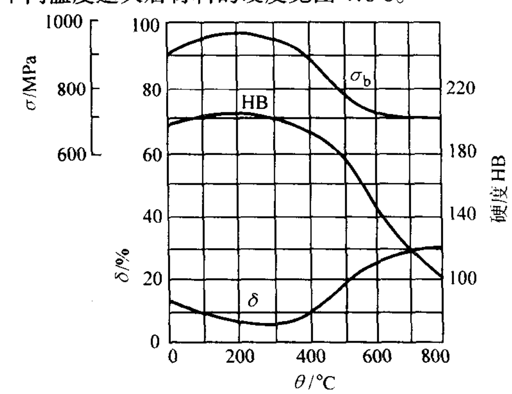


图4.6-8　QAl10-3-1.5硬度和拉伸性能与退火温度（保温1 h）的关系

退火温度和冷却方式对挤制管硬度的影响见图4.6-9。

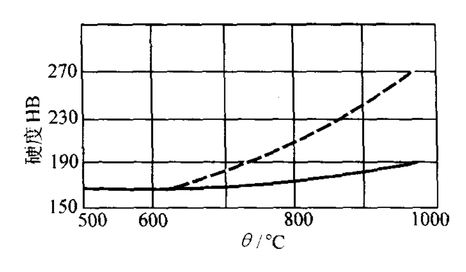


图4.6-9　QAl10-3-1.5硬度与退火温度、冷却速度的关系

原材料：挤制管材

——空冷；- - -水冷

3）拉伸性能　供应状态材料的拉伸性能见表4.6-27。

表4.6-27　供应状态材料的拉伸性能

品种	状态	σ_b/MPa		δ/%	
		min	max	min	max
棒材	R	590	685	16	44
管材	R	560	725	11	38

不同变形率材料的拉伸性能见图4.6-10。

不同条件热处理后棒材的拉伸性能见表4.6-28。

4）冲击性能　850℃淬火后不同温度回火（保温1 h，空冷）棒材的冲击韧度见表4.6-29。

高温冲击韧度见图4.6-11。

5）扭转和剪切性能　抗剪强度 $\tau=372$ MPa（铸态）。

6）耐磨性能　摩擦因数 $\mu=0.01$（有润滑剂）；$\mu=0.2$（无润滑剂）。

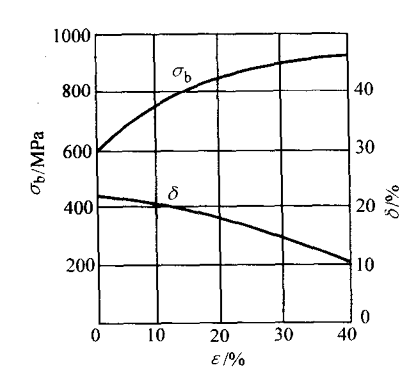


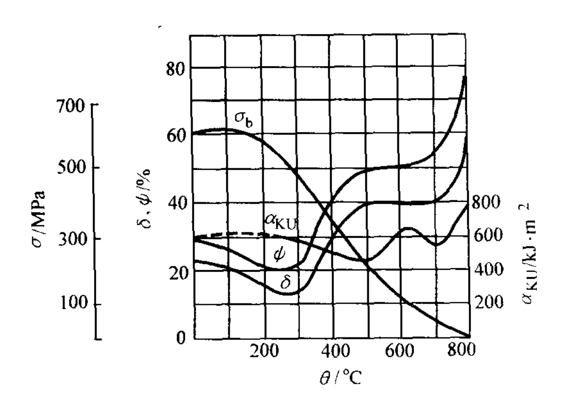
图 4.6-10　QAl10-3-1.5 拉伸性能与变形率的关系
原材料：δ3 mm 的热轧板材

表 4.6-28　不同条件热处理后棒材的拉伸性能

热处理制度		σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ	ψ
淬火温度/℃	回火	MPa		%	
850	—	830	340	17.0	20.2
	300℃，1 h，空冷	795	395	17.7	32.2
	350℃，1 h，空冷	815	355	18.4	28.7
	400℃，1 h，空冷	810	340	22.2	35.5
	450℃，1 h，空冷	745	335	15.7	—

表 4.6-29　850℃淬火后不同温度回火（保温 1 h，空冷）棒材的冲击韧性

回火温度/℃	—	300	350	400	450
a_{KU}/kJ·m^{-2}	617	588	539	578	382



原材料：δ3 mm 板材，ε = 40%
图 4.6-11　QAl10-3-1.5 的高温力学性能

7）蠕变性能　铸态棒的蠕变极限见表 4.6-30。

表 4.6-30　铸态棒的高温蠕变极限

θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{0.1/1\,000}$/MPa
200	415	130
300	370	37

8）疲劳性能　循环次数 N 为 10^8 周时，铸态棒的疲劳强度 σ_D = 210 MPa。

9）弹性性能　弹性模量 E = 102 GPa（R 态棒材）。

（6）工艺性能

1）熔炼与铸造工艺　合金常用中频或工频无芯感应电炉熔炼，由于元素铝易氧化生成高熔点的氧化铝，形成悬浮渣不易清除，因此应使用能溶解氧化铝的冰晶石溶剂覆盖。合金采用半连续铸造工艺浇注铸锭，铸造温度为 1 180 ~ 1 240℃。合金凝固温度范围小、流动性好，可得到致密性好的铸锭或铸件。

2）成形性能　合金在高温下有良好的塑性，可进行热加工，如热锻、热挤和热轧。热加工温度为 775 ~ 825℃。

3）焊接性能　合金能良好地进行氩弧焊、电阻点焊和闪光焊，也可以进行铜焊，但不宜气焊、锡焊和电渣焊。

4）表面处理工艺　酸洗：采用硫酸 + 无水硫酸铁溶液，温度为 60 ~ 80℃；光亮处理：采用混合酸浸渍 3 ~ 5 s。混合酸的成分为 H_2SO_4（600 ~ 800）g/L，HNO_3（300 ~ 600）g/L，NaCl（3 ~ 5）g/L。

5）切削加工与磨削性能　合金的切削加工性为易切削黄铜 HPb63-3 的 30%。

（7）选用实例

该合金主要用做齿轮、摇臂、衬套、轴套、圆盘接管嘴、轴承、固定螺母等高强度的和耐磨的结构零件，可大批量生产，质量稳定。

1.4　铝青铜 QAl10-4-4

（1）牌号、规格与供应状态

材料牌号：铝青铜 QAl10-4-4。

相近牌号：见表 4.6-31。

品种规格与供应状态见表 4.6-32。

（2）化学成分

1）QAl10-4-4 的化学成分见表 4.6-33。

2）合金组织结构　高于 950℃时为 α + β，室温时为 α + κ，κ 相为铁镍铝三元化合物，其析出形式和分布形态与热处理条件有关，控制淬火和回火条件能改变 κ 相的析出量、尺寸和形状，当 κ 相呈颗粒状分布时，有利于提高合金的力学性能。

表 4.6-31　材料的国外相近牌号

国　别	俄罗斯	美国	英国	法国	德国	日本	ISO
牌　号	БРАЖН10-4-4	C63000	CA104	CuAl9Ni5	CuAl10Ni	C6301	CuAl10Fe5Ni5

表 4.6-32　合金的品种规格与供应状态

品　种	d 或 $D \times S$/mm	供应状态
棒　材	10 ~ 160	R
管　材	(20 ~ 250) × (30 ~ 50)	R

（3）物理及化学性能

1）物理性能　密度：ρ = 7.68 g/cm^3；熔化温度范围：1 038 ~ 1 054℃；热导率：λ = 75.4 W/(m·K)；比热容：c = 376.8 J/(kg·K)；线胀系数见表 4.6-34；电导率：g = 9.0% IACS；电阻率：ρ = 0.193 μΩ·m；磁性能：合金的磁导率 μ = 1.05。

表 4.6-33　合金的化学成分（质量分数）　%

Al	Fe	Ni	Cu	Sn	Zn	Mn	Pb	Si	P	杂质总和
				≤						
9.5 ~ 11.0	3.5 ~ 5.5	3.5 ~ 5.5	余量	0.1	0.5	0.3	0.02	0.1	0.01	1.0

表 4.6-34 合金的线胀系数

θ/℃	0~150	0~300	0~593	0~-20	0~-40	0~-60	0~-80	0~-100	0~-120	0~-140	0~-180	0~-196
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	16.56	17.28	19.26	16.26	15.40	14.90	14.55	14.15	13.80	13.45	12.40	11.50

2）化学性能 抗氧化性能：高温抗氧化性能好；耐腐蚀性能：合金在大气、淡水和海水中有很好的耐蚀性能。对碱、非氧化性酸、磷酸、乙酸、硫酸和酚类都有较高的耐蚀性。在海水中的腐蚀量为 0.007 5 g/（m^2·h），在 10%硫酸溶液中为 0.024 g/（m^2·h）。

（4）热处理

退火：650~700℃，1~2 h。淬火和回火：900℃水淬，500~600℃回火 1~2 h，空冷。

（5）力学性能

1）技术标准规定的性能见表 4.6-35。

表 4.6-35 技术标准规定的性能

品种	状态	d/mm	σ_b/MPa	δ_{10}/%	δ_5/%	HBS	技术标准
			≥				
棒材	R	10~29	690	4	5	170~240	GB/T 13808—1992
		>29~120	635	5	6	170~240	
		>120~160	590	5	6	170~240	
管材	R	壁厚 3~50	635	5	6	170~230	GB/T 1528—1997

2）硬度 供应状态材料的硬度见表 4.6-36。

表 4.6-36 供应状态材料的硬度

品 种	状 态	d 或 D/mm	硬度 HB min	硬度 HB max
棒 材	R	10~29	170	236
		30~150	180	237
管 材	R	42~70	—	—

挤制棒材的高温和低温硬度见表 4.6-37。

表 4.6-37 挤制棒材的高温和低温硬度

θ/℃	-181	-59	-7	93	204	315
硬度 HB	283	210	205	188	181	180

回火温度对材料硬度的影响见表 4.6-38。

表 4.6-38 回火温度对材料硬度的影响

试样状态	回火温度/℃	500	550	600	650	700	未回火
挤制棒 900℃淬火后，回火（保温 1 h）	HBS	196	197	194	190	194	197

3）拉伸性能 供应状态材料的拉伸性能见表 4.6-39。

表 4.6-39 供应状态材料的拉伸性能

品种（d 或 D/mm）	状态	σ_b/MPa min	σ_b/MPa max	δ/% min	δ/% max
管材	R	657	814	7	30
棒材（<29）	R	696	843	10	28
棒材（>29）		657	814	8	7

变形率和退火温度对材料拉伸性能的影响分别见图 4.6-12 和图 4.6-13。

高温拉伸性能见图 4.6-14。

挤制棒经 900℃淬火，不同温度回火后（保温 1 h）的拉伸性能见表 4.6-40。

低温拉伸性能见表 4.6-41。

4）冲击性能 挤制棒材 900℃加热 1 h，水冷，经不同温度回火（保温 1 h）后的冲击韧度 a_{KU} 见表 4.6-42。

5）抗剪强度 τ = 440 MPa（硬模铸棒）。

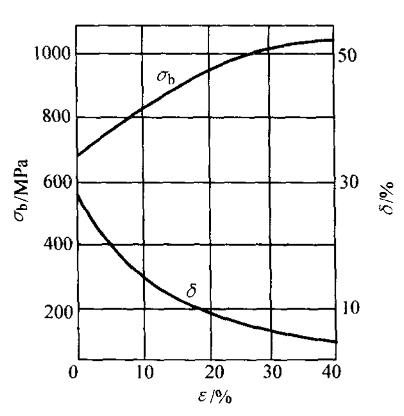


图 4.6-12 QAl10-4-4 拉伸性能与变形率的关系
原材料：δ = 3 mm 板材，800℃退火 1 h

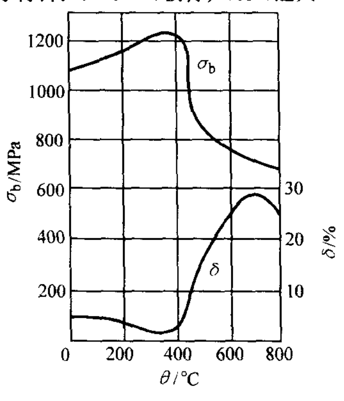


图 4.6-13 QAl10-4-4 拉伸性能与退火温度（保温 1 h）的关系
原材料：δ = 3 mm 板材，ε = 40%

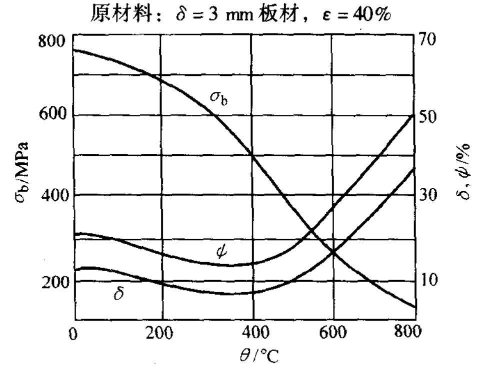


图 4.6-14 QAl10-4-4 的高温拉伸性能

表 4.6-40 挤制棒经 900℃淬火，不同温度回火后（保温 1 h）的拉伸性能

回火温度/℃	未回火	500	550	600	650	700
σ_b/MPa	735	770	765	760	705	755
$\sigma_{0.2}$/MPa	435	515	520	435	455	440
δ/%	5.5	8.5	11.0	11.0	14.0	12.5

表 4.6-41 合金的低温拉伸性能

状　态	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ①/%	ϕ/%
R	-7	735	450	25	30
	-59	770	435	26	30
	-181	860	485	10	12

① 标距为 50.8 mm。

表 4.6-42 挤制棒材 900℃加热 1 h，水冷，经不同温度回火（保温 1 h）后的 a_{KU} 值

回火温度/℃	未回火	500	550	600	650	700
a_{KU}/kJ·m^{-2}	168	158	169	149	255	243

6）耐磨性能　摩擦因数 μ = 0.013（有润滑剂），μ = 0.20（无润滑剂）。

7）持久和蠕变性能　挤制棒材经 700℃，3 h 热处理后的高温持久性能见表 4.6-43。

表 4.6-43 挤制棒材经 700℃，3 h 热处理后的高温持久性能

θ/℃	σ_{1000}/MPa	σ_{10000}/MPa	σ_{30000}/MPa	σ_{100000}①/MPa
150	610	590	580	560
200	520	470	430	400
250	400	330	310	270
300	280	220	190	160

① σ_{100000}系外推值。

挤制棒材经 700℃，3 h 热处理后的高温蠕变性能见表 4.6-44。

表 4.6-44 挤制棒材经 700℃，3 h 热处理后的高温蠕变性能

θ/℃	$\sigma_{1/1000}$/MPa	$\sigma_{1/10000}$/MPa	$\sigma_{1/30000}$/MPa	$\sigma_{1/100000}$①/MPa
150	340	320	310	290
200	310	280	270	260
250	280	260	250	230
300	230	180	160	130

① $\sigma_{1/100000}$系外推值。

8）疲劳性能　循环次数 N 为 5×10^7 周时，挤压棒材的疲劳强度 σ_D = 245 MPa；循环次数 N 为 5×10^7 周时，软态棒材的试样在海雾环境条件下的疲劳强度极限 σ_D = 345 MPa。

9）弹性性能　弹性模量见表 4.6-45。

表 4.6-45 材料的弹性模量

状　态	铸　态	热处理的铸件	热处理的挤制棒
E/GPa	115	125	125

（6）工艺性能

1）熔炼与铸造工艺　由于合金中含高量的铝和镍在熔炼过程中易氧化，形成高熔点的悬浮渣不易清除，应使用能溶解氧化铝的冰晶石作覆盖剂和精炼剂，同时尽量避免熔体过热，以降低吸气量。通常用中频或工频无芯感应电炉熔炼，半连续铸造工艺浇注铸锭。铸造温度为 1 220～1 260℃。合金凝固温度范围小，流动性好，能得到致密性的铸锭和铸件。

2）成形性能　合金在高温下有良好的塑性，能进行多种形式的热加工，如热锻、热挤、热弯等。热加工温度为 850～900℃。

3）焊接性能　合金宜进行氩弧焊，将焊件预热 200℃能得到良好的焊接性能，也能进行接触电阻焊，如点焊、喷射焊和闪光焊。当使用带合适的焊料的银焊条时也能钎焊。

合金不宜锡焊、电渣焊和气焊。若必须采用气焊时，应将火焰调成非氧化性的。

4）零件热处理工艺　900℃（加热 2 h）水淬，400℃回火 1.5 h，而为了获得高的冲击韧度应在 650℃回火 2 h。

5）表面处理工艺　酸洗：采用 50～80℃的硫酸－重铬酸钠的水溶液；光亮处理：采用磷酸（55%，体积分数）＋硝酸（20%，体积分数）＋乙酸（25%，体积分数）水溶液于 60～80℃浸渍。

6）切削加工与磨削性能　合金的切削加工性为易切削黄铜 HPb63-3 的 20%～30%。

（7）选用实例

合金主要用于制造飞机起落架作动筒的衬套以及辅机结构用的高强度轴套、球形座、助力器滑块、导向螺杆、从动轴、支撑圈、燃油分配活门、连杆和螺母等。

1.5 铝青铜 QAl11-6-6

（1）牌号、品种规格与供应状态

材料牌号：铝青铜 QAl11-6-6。

相近牌号：见表 4.6-46。

表 4.6-46 材料的国外相近牌号

国　别	俄罗斯	英国	德国
牌　号	БРАЖН11-6-6	CA104	CuAl11Ni

品种规格与供应状态见表 4.6-47。

表 4.6-47 合金的品种规格与供应状态

品　种	d 或 $D\times S$/mm	供应状态
棒　材	10～160	R

（2）化学成分

QAl11-6-6 的化学成分见表 4.6-48。

表 4.6-48 合金的化学成分（质量分数）　%

Al	Fe	Ni	Cu	Sn	Zn	Mn	Pb	Si	P	杂质总和
				≤						
10.0～11.5	5.0～6.5	5.0～6.5	余量	0.1	0.6	0.5	0.05	0.2	0.1	1.5

（3）物理及化学性能

1）物理性能　密度：ρ = 8.1 g/cm^3；熔化温度范围：液相线温度 1 141.5℃；热导率：λ = 63.64 W (m·K)；线胀系数：$\alpha = 14.9\times10^{-6}$ K^{-1}（20～100℃）。

2）化学性能　抗氧化性能：高温抗氧化性能好；耐腐蚀性能：合金在大气、淡水和海水中有很好的耐蚀性能。对碱、非氧化性酸、磷酸、乙酸、硫酸和酚类都有较高的耐蚀性。在 35%硫酸溶液中的腐蚀量为 0.04 g/（m^2·h）。

(4) 热处理

退火：650～700℃，1～2 h。淬火和回火：925℃水淬，500～600℃回火1～2 h，空冷。

(5) 力学性能

1) 技术标准规定的性能见表4.6-49。

表4.6-49 技术标准规定的性能

品种	状态	d/mm	σ_b/MPa	δ_{10}/% ≥	技术标准
棒材	R	10～28 >28～50	690 635	4 5	GB/T 13808—1992

2) 硬度 供应状态材料的硬度见表4.6-50。

表4.6-50 供应状态材料的硬度

品 种	状 态	d或D/mm	HV	
			min	max
棒 材	R	10～50	246	375

挤制棒材的高温和低温硬度见表4.6-51。

表4.6-51 挤制棒材的高温硬度

θ/℃	300	500
硬度HRB	21.4	20.7

3) 拉伸性能 铸造状态材料的力学性能见表4.6-52。

表4.6-52 铸造状态材料的力学性能

铸造方法	σ_b/MPa	δ_{10}/%	ψ/%	HBS
	≥			
铁模铸造	600	8	2	260
砂模铸造	550	3	2	150

淬火温度和回火温度对材料室温力学性能的影响分别见图4.6-15和图4.6-16。

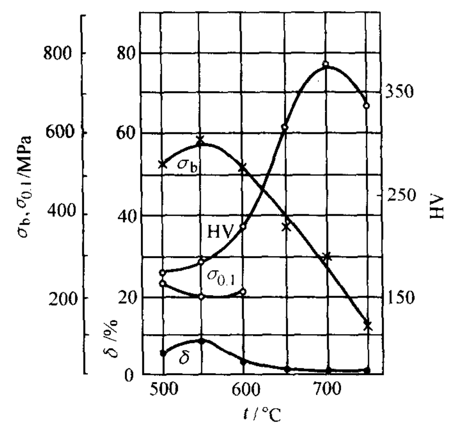


图4.6-15 QAl11-6-6室温力学性能与淬火温度的关系

原材料：先加热到1 000℃而后随炉冷至所需温度淬火

加工棒材的高温拉伸性能见表4.6-53。

室温力学性能与热处理的关系见表4.6-54。

(6) 工艺性能

1) 熔炼与铸造工艺 由于合金中含高量的铝和镍在熔炼过程中易氧化，形成高熔点的悬浮渣不易清除，应使用能溶解氧化铝的冰晶石作覆盖剂和精炼剂，同时尽量避免熔体过热，以降低吸气量。通常用中频或工频无芯感应电炉熔炼，半连续铸造工艺浇注铸锭。铸造温度为1 220～1 280℃。合金凝固温度范围小，流动性好，能得到致密性的铸锭和铸件。

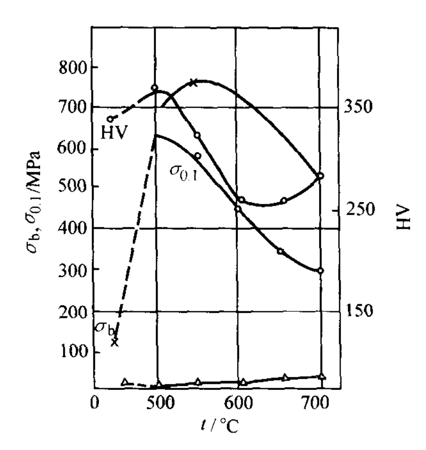


图4.6-16 QAl11-6-6室温力学性能与回火温度的关系

原材料：保温2 h，淬火温度1 000℃

表4.6-53 合金的高温拉伸性能

θ/℃	σ_b/MPa	δ/%	ψ/%
100	650	1.3	3
300	550	1.4	1.5
500	330	4.5	4.5

表4.6-54 合金室温力学性能与热处理的关系

热处理类型	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	HV
900～950℃热轧→6%冷轧→700℃退火1h→6%冷轧→700℃退火1 h	888	583	16	288
925℃加热1 h，空冷	898	358	14	246
925℃加热1 h，水淬后400℃回火24 h，空冷	1 005	713	8	365
800℃加热1 h，水淬后400℃回火24 h，空冷	931	438	11	272

2) 成形性能 合金在高温下有良好的塑性，能进行多种形式的热加工，如热锻、热挤、热弯等。热加工温度为880～950℃。

3) 焊接性能 合金宜进行氩弧焊，将焊件预热200℃能得到良好的焊接性能，也能进行接触电阻焊，如点焊、喷射焊和闪光焊。当使用带合适的焊料的银焊条时也能钎焊。

合金不宜锡焊、电渣焊和气焊。若必须采用气焊时，应将火焰调成非氧化性的。

4) 零件热处理工艺 925℃（加热2 h）水淬，400℃回火1.5 h，而为了获得高的冲击韧度应在650℃回火2 h。

5) 表面处理工艺 酸洗：采用50～80℃的硫酸－重铬酸钠的水溶液；光亮处理：采用磷酸（55%，体积分数）＋硝酸（20%，体积分数）＋乙酸（25%，体积分数）水溶液于60～80℃浸渍。

6) 切削加工与磨削性能 合金的切削加工性尚可。

(7) 选用实例

合金主要用于制造高强度的耐磨零件和在500℃以下工作的零件。

1.6 铸造铝青铜ZCuAl10Fe3

(1) 牌号、品种规格与供应状态

材料牌号：铸造铝青铜ZCuAl10Fe3。

相近牌号：见表4.6-55。

表 4.6-55 合金的国外相近牌号

国别	俄罗斯	德国	日本	美国	英国	法国
牌号	БРАЖ9-4Л	CuAl8Fe	ALBC1	C95200	AB1	UA9FeY30，UA9FeY200

品种规格与供应状态：铸件。

(2) 化学成分

1) ZCuAl10Fe3 的化学成分见表 4.6-56。

表 4.6-56 材料的化学成分（质量分数） %

Al	Fe	Cu	Ni	Sn	Zn	Pb	Mn	Si	杂质总和
			≤						
8.0～10.0	2.0～4.0	余量	3.0	0.3	0.4	0.2	1.0	0.2	1.0

2) 合金组织结构 在生产冷却条件下，铸态组织为 $\alpha+\beta+FeAl_3$。若冷却缓慢，组织中产生少量（$\alpha+\gamma_2$）共析体。加热到950℃以上时，为β相，淬火后，β相通过无扩散相变形成β′相马氏体组织。低于共析转变温度回火，β′共析分解成（$\alpha+\gamma_2$）共析体。不同回火制度的共析体的形态有所不同。

(3) 物理及化学性能

1) 物理性能 密度：$\rho=7.50\sim7.66$ g/cm³；熔化温度范围：1 039～1 047℃；热导率：$\lambda=53.6$ W/（m·K）；比热容：$c=376.8$ J/（kg·K）；线胀系数：$\alpha=18.0\times10^{-6}$ K⁻¹（20～100℃），$\alpha=19.0\times10^{-6}$ K⁻¹（20～300℃）；电导率：$g=10.5\%\sim12\%$IACS；电阻率：$\rho=0.143\sim0.164$ μΩ·m；磁性能：在磁场强度 $H=16$ kA/m 时，合金的磁导率 $\mu=1.2$。

2) 化学性能 抗氧化性能：抗高温氧化性能好；耐腐蚀性能：合金在大气、淡水和海水中有高的化学稳定性。在海水中每昼夜的质量损失为0.25 g/（m²·d）。对盐酸、硫酸、乙酸和氯水等也有良好的耐蚀性，但在碱性溶液中腐蚀速度较快。

(4) 热处理

合金热处理强化作用不明显。经淬火和回火后硬度稍有提高，适当的常化处理能减少脆性。淬火和回火：950～1 000℃淬火，300～400℃，1～3 h 回火。常化处理：650～700℃，1～4 h 退火，空冷。消除应力退火：300～400℃，1～2 h，空冷。

(5) 力学性能

1) 技术标准规定的性能见表 4.6-57。

表 4.6-57 技术标准规定的性能

铸造方法	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	HBS	技术标准
	≥				
砂型（S）	490	180	13	100	GB/T 1176—1987
金属型（J）	540	200	15	110	

2) 硬度 不同铸造方法铸棒的硬度见表 4.6-58。

表 4.6-58 不同铸造方法铸棒的硬度

铸造方法	砂型	金属型	熔模
硬度 HB ≥	100	125	110

合金组成成分变化对铸棒硬度的影响见表 4.6-59。

表 4.6-59 合金组成成分变化对铸棒硬度的影响

w（Al/Fe）/%	8.13/2.74	8.74/3.33	9.23/2.63	9.27/2.97
硬度 HB	101～121	104～114	110～129	107～125

3) 拉伸性能 不同铸造方法铸棒的拉伸性能见表 4.6-60。

表 4.6-60 不同铸造方法铸棒的拉伸性能

铸造方法	状态	σ_b/MPa	δ/%	ψ/%
砂型	铸态	505	34	29
金属型	铸态	520	30	—

合金组成成分变化对铸棒拉伸性能的影响见表 4.6-61。

表 4.6-61 合金组成成分变化对铸棒拉伸性能的影响

w_{Al}/%	w_{Fe}/%	合金组织共析体/%	σ_b/MPa	δ_5/%
8.74	3.33	10～15（2～3）	456（476）	35（52）
9.23	2.63	25～30（2～3）	411（490）	14（38）
9.27	2.97	20～30（5～7）	441（500）	14.5（40）

注：w 为质量分数，共析体为体积分数，括号前数值为铸态之值，括号内数值为650～700℃常化处理的值。

金属模铸棒的高温拉伸性能见图 4.6-17。

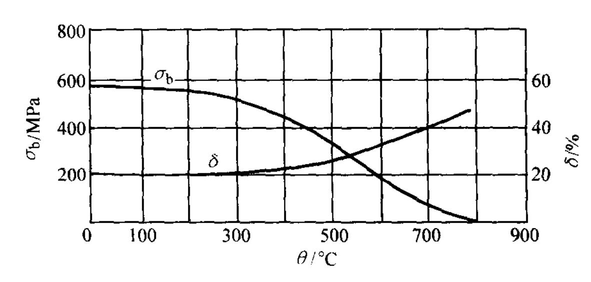


图 4.6-17 ZCuAl10Fe3 的高温拉伸性能

压缩性能：抗压强度 $\sigma_{bc}=980$ MPa。

4) 冲击性能 室温冲击韧度 $a_{KU}=588$ kJ/m²。高温冲击韧度见图 4.6-18。

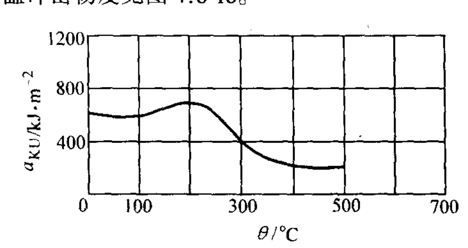


图 4.6-18 ZCuAl10Fe3 的高温冲击韧度

5) 扭转和剪切性能 抗剪强度 $\tau=265$ MPa（铸态）。

6) 耐磨性能 摩擦因数 $\mu=0.012$（有润滑剂），$\mu=0.18$（无润滑剂）。

7) 蠕变性能 压铸试棒的高温蠕变性能见表 4.6-62。

表 4.6-62 压铸试棒的高温蠕变性能

θ/℃	204	315
$\sigma_{0.1/10000}$/MPa	132	38

8) 疲劳性能 金属型铸棒在循环 5×10^7 周时的疲劳强度极限 $\sigma_D=210$ MPa。

9) 弹性性能 弹性性能量 $E=110$ GPa（金属型）；切变模量：$G=41.3$ GPa（金属型）；泊松比 $\mu=0.335$（金属型）。

(6) 工艺性能

1) 熔炼工艺 合金通常用感应电炉或坩埚炉熔炼。铝在高温下易氧化，生成悬浮渣，应使用能溶解氧化铝的冰晶石溶剂覆盖或造渣精炼。若使用回炉料，熔化后要用少量氯

化锌精炼和吹 N_2 除气。

使用中间合金的熔炼程序为：熔化纯铜→加回炉料→加中间合金→加氯化锌精炼→扒渣→吹 N_2 除气→调温浇注。

不用中间合金的熔炼程序为：铁屑（除去油的低碳钢屑）上面覆盖部分铜块一起开熔→加部分铜→钢屑熔化2/3后加铝搅拌→加铜调温→加氯化锌精炼→扒渣→吹 N_2 除气→浇注。但要控制加铝后熔体局部过热程度，以防止合金熔体大量吸气。

2）铸造工艺 铸造性能：该合金具有窄的结晶温度范围（1 039～1 047℃），凝固时具有壳型结晶特征；流动性高，1 200℃时为85 cm，易于充型；线收缩率大（为2.5%），易形成集中的深缩孔；元素铝在熔化和浇铸过程中易氧化，生成悬浮性的一次氧化渣和二次氧化渣；熔体有较强的吸气性，易形成气孔。

铸造方法：宜采用金属型、半金属型、干砂型和熔模精铸工艺。

浇铸温度：大型件为1 060～1 110℃；小型件为1 120～1 160℃。

3）成形性能 该合金除作铸造合金使用外，还作为热压力加工的变形合金使用。在750～850℃时有良好的热加工性。

4）焊接性能 合金能进行气体保护电弧焊、电阻焊，但不宜锡焊和气焊。

5）表面处理工艺 除氧化膜：浸入4%～5%NaCl溶液中，然后用肥皂水洗。化学抛光：于室温下在2份醋酸+5份硫酸和1份40%氢氟酸混合液中浸渍。

6）切削加工与磨削性能 合金的切削加工性为易切削黄铜HPb63-3的50%～60%。

（7）选用实例

该合金可在铸态下应用，也可在变形态下使用。主要用作在中等载荷和中等速度下工作的耐磨零件以及高强度耐蚀结构零件，如齿轮、衬套、垫圈、扇形摇臂、支撑环、支架等。

2 其他高强度热稳定铜合金

具有高强度热稳定性的其他铜合金主要有硅青铜QSi1－3和锰黄铜HMn60-3-0.75两种。

QSi1-3是Cu-Ni-Si-Mn系的可热处理强化的热强型合金。元素镍与硅形成 Ni_2Si 金属间化合物，它在铜中的溶解度随温度下降而急剧减小，并析出弥散的质点相使合金明显强化。少量的锰进一步强化合金和提高耐蚀性。

HMn60-3-0.75锰黄铜是Cu-Zn-Mn-Si-Pb系铜基多元合金。锰和硅的加入提高了合金的强度和硬度，铅的加入增强了其耐磨性。

2.1 硅青铜QSi1-3

（1）牌号、品种规格与供应状态

材料牌号：硅青铜QSi1-3。

相近牌号：БРНК1-3（俄罗斯），C64700（美国），$CuNi_3Si$（德国）。

品种规格与供应状态：挤制棒材（R），直径20～100 mm，圆棒。

（2）化学成分

1）合金的化学成分见表4.6-63。

表4.6-63 材料的化学成分（质量分数） %

Mn	Si	Ni	Cu	Sn	Al	Zn	Fe	Pb	杂质总和
				≤					
0.1～0.4	0.6～1.1	2.3～3.4	余量	0.1	0.02	0.2	0.1	0.15	0.5

2）合金组织结构 合金经高温固溶处理并淬火后为α单相组织，时效时析出质点状的 Ni_2Si 金属间化合物。

（3）物理及化学性能

1）物理性能 密度：$\rho=8.6\ g/cm^3$；熔化温度范围：液相点1 051.4℃；热导率：$\lambda=105\ W/(m\cdot K)$；线胀系数 $\alpha=18\times10^{-6}K^{-1}$（20～200℃）；电导率：不同温度退火后保温时间与电导率的关系见图4.6-19；电阻率：$\rho=0.046\ \mu\Omega\cdot m$（硬态），$\rho=0.083\ \mu\Omega\cdot m$（时效状态）；磁性能：无磁性。

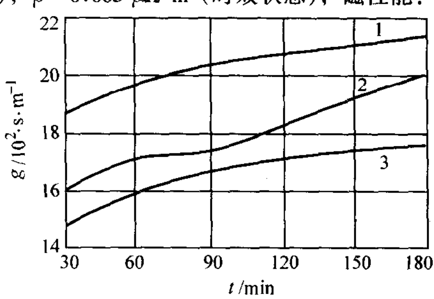


图4.6-19 QSi1-3电导率与不同温度下保温时间的关系

1—475℃；2—450℃；3—425℃

2）化学性能 抗氧化性能：合金试样在下列温度于空气中加热1 h的平均增重见表4.6-64。耐腐蚀性能：合金在大气、淡水和海水中表面能形成致密的氧化物保护膜，因此在这些介质中合金有高的耐蚀性。在硫酸、盐酸、乙酸和碱的稀溶液中也有良好的耐蚀性。但在潮湿的氨、氢氧化铵、硝酸以及氢氧化钾等溶液中腐蚀速度较快。

表4.6-64 合金试样在下列温度于空气中加热1 h的平均增重

加热温度/℃	500	600	700	800
平均增重/mg·(cm²·h)⁻¹	0.23	0.48	0.84	—

（4）热处理

合金可热处理强化。高温加热并淬火后得到过饱和的固溶体，时效时析出 Ni_2Si 使合金强化。时效前进行冷变形，能更迅速地达到有效的强化。淬火：850～875℃，水淬。时效：450～475℃，2～4 h，空冷。

（5）力学性能

1）技术标准规定的性能见表4.6-65。

表4.6-65 技术标准规定的性能

品种	状态	直径/mm	σ_b/MPa ≥	δ_{10}/% ≥	技术标准
棒材	R	20～80	490	10	GB/T 13808—1992

2）硬度 室温硬度130～180HBS（R态），150～200HBS（Y态）。

变形率对材料以及对热处理后材料硬度的影响见图4.6-20。

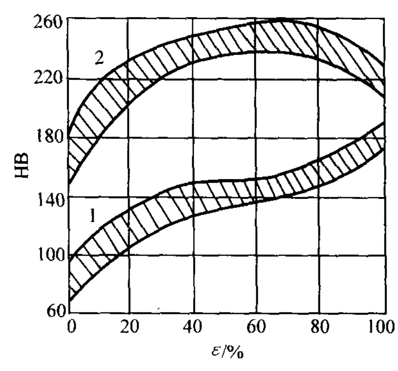


图4.6-20 QSi1-3硬度与变形率的关系

1—冷拉态；2—热处理态

退火温度和不同时效条件对材料硬度的影响分别见图 4.6-21 和图 4.6-22。

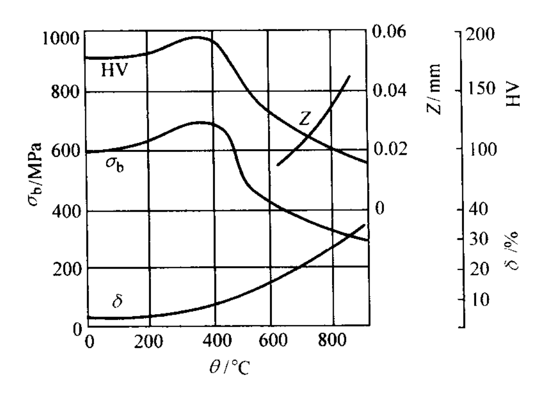


图 4.6-21 QSi1-3 硬度和拉伸性能与退火温度（保温 1 h）的关系
原材料：δ2 mm 软条，$\varepsilon = 70\%$

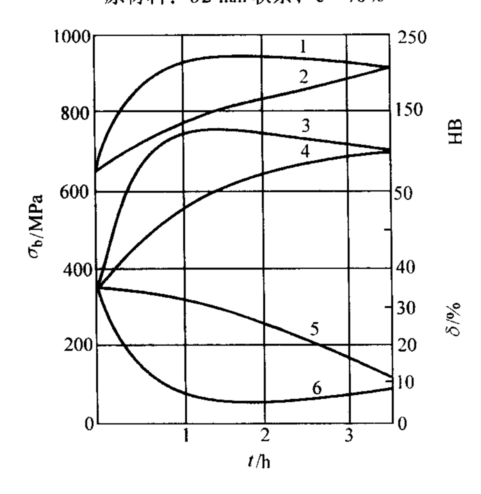


图 4.6-22 QSi1-3 硬度和拉伸性能与时效保温时间的关系
原材料：挤压棒材于 860℃淬火
1—HB，500℃；2—HB，450℃；3—σ_b，500℃；
4—σ_b，450℃；5—δ，500℃；6—δ，450℃

3）拉伸性能 供应状态材料的拉伸性能见表 4.6-66。

表 4.6-66 供应状态材料的拉伸性能

品种	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_{10}/%	ψ/%
		≥			
棒材	热轧	420	—	27	—
	变形 40%	580	520	8	28
带材	变形 80%	680	—	5	—
棒材	淬火	350	150	30	70
	时效后	750	550	7	11

变形率对材料拉伸性能的影响见图 4.6-23。

高温拉伸性能见图 4.6-24。

4）耐磨性能 摩擦因数 $\mu = 0.015$（有润滑剂），$\mu = 0.35$（无润滑剂）。

5）冲击性能 挤制棒热处理后的冲击韧度 $a_{KU} = 400$ kJ/m^2；软态棒 $a_{KU} = 400 \sim 1\ 000$ kJ/m^2。

6）持久和蠕变性能 高温持久性能和高温蠕变性能见图 4.6-25。

7）疲劳性能 循环次数 N 为 10^7 周时，挤制棒热处理后的疲劳强度 $\sigma_D = 225$ MPa。

8）弹性性能 弹性模量 $E = 140$ GPa（热轧态）。

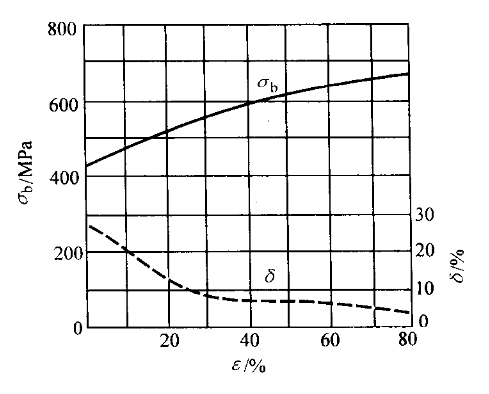


图 4.6-23 QSi1-3 拉伸性能与变形率的关系
原材料：热轧板材

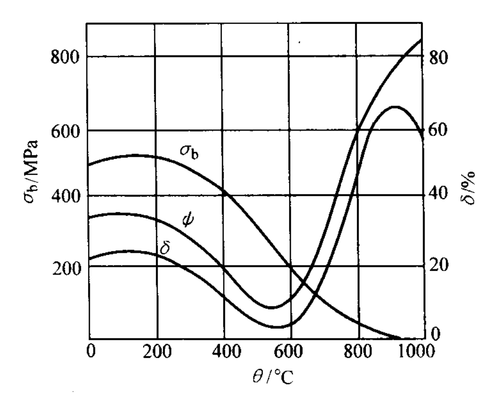


图 4.6-24 QSi1-3 高温拉伸性能

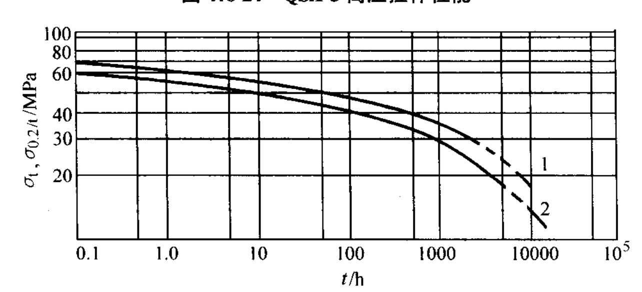


图 4.6-25 QSi1-3（含 0.2%Cr）在 300℃时的高温持久性能和蠕变性能
原材料：900℃水淬，60%冷加工，390℃，3 h 时效
1—σ_t；2—$\sigma_{0.2/t}$

（6）工艺性能

1）熔炼与铸造工艺 该合金可采用工频（有芯或无芯）或中频感应电炉熔炼，硅砂或镁砂炉衬，由于吸气性强，应使用煅烧木炭作覆盖剂。浇铸过程在烟灰覆盖下，采用半连续铸造工艺浇注铸锭。铸造温度为 1 180 ~ 1 220℃。

2）成形性能 合金有良好的热加工性和一定的冷加工性。通常采用热挤压。热挤压温度为 800 ~ 910℃。

3）焊接性能 合金易于锡焊、铜焊、闪光焊和气体保护焊，也能气焊，但不宜电渣焊和埋弧焊。

4）切削加工与磨削性能 合金的切削加工性为易切削黄铜 HPb63-3 的 30%。

（7）选用实例

该合金在航空上主要用做在较高温度（300℃以下）工作的零件，包括润滑不良、单位压力不大的摩擦零件，如航空发动机的排气门和进气门的导向套、对开球形座等。

2.2 锰黄铜 HMn60-3-1-0.75

（1）牌号、品种规格与供应状态

材料牌号：锰黄铜 HMn60-3-1-0.75。

品种规格与供应状态见表 4.6-67。

表 4.6-67　材料的品种规格与供应状态

品　种	d/mm	供应状态
棒　材	11 ~ 50 50 ~ 125	拉制，Y 挤制，R

(2) 化学成分

1) HMn60-3-1-0.75 的化学成分见表 4.6-68。

表 4.6-68　合金的化学成分（质量分数）　%

Cu	Mn	Si	Pb	Zn	Fe	Sn	Al	杂质总和
					≤			
59.5 ~ 61.5	2.0 ~ 3.25	0.5 ~ 1.50	0.5 ~ 1.0	余量	0.35	0.30	0.25	0.5

2) 合金组织结构　合金铸态高倍金相组织：基体为 α + β 相，Pb 呈黑色小颗粒均匀分布在基体上，同时有少量 Mn_5Si_3 化合物颗粒。拉制棒（Y）高倍金相组织：基体为 β 相，上面分布颗粒较大的硬化相硅锰化合物，该相在冷加工时沿加工方向破碎，退火温度 400℃ 以上有少量 α 相析出。挤制棒材（R）高倍金相组织：基体为 β 相，上面分布硅锰化合物及少量 Pb 质点。

(3) 物理及化学性能

密度：ρ = 8.368 g/cm³；电导率：g = 19.10% IACS (20℃)；化学性能：在海水、过热蒸汽、航空液压泵介质中具有良好的耐腐蚀性。

(4) 热处理

合金可热处理强化。固溶制度：705℃ ± 10℃，水冷。时效制度：320℃ ± 5℃，2 h。退火制度：420℃ ~ 450℃。

(5) 力学性能

1) 技术标准规定的力学性能见表 4.6-69。

表 4.6-69　技术标准规定的性能

品种	d/mm	状态	$\sigma_{P0.5}$/MPa	δ_{10}/%	技术标准
			≥		
棒材	> 11 ~ 25	Y	471	15	LTJ 303—1997
	> 25 ~ 50	Y	441	16	
	> 50 ~ 80	R	392	12	
	> 80 ~ 100	R	370	12	
	> 100 ~ 125	R	350	12	

2) 硬度　供应状态棒材的室温硬度与不同退火制度的硬度分别见表 4.6-70 和表 4.6-71。

表 4.6-70　供应状态材料的室温硬度

品　种	状　态	HB		HRB	
		min	max	min	max
棒材	Y	146	169	75	92.5
	R	92.8	118	41	60

表 4.6-71　棒材在不同退火制度下的硬度

退火温度/℃	250	300	350	400	450	500	550	600
退火时间/h	1	1	1	1	1	1	1	1
HRB	81.0 ~ 83.5	82.0 ~ 86.5	78 ~ 84	75.5 ~ 76.0	76.0 ~ 78.0	74.5 ~ 75	69.0 ~ 72.0	61.5 ~ 68.5

3) 拉伸性能　供应状态下材料的拉伸性能见表 4.6-72。

表 4.6-72　供应状态下材料的拉伸性能

品种	状态	σ_b/MPa		$\sigma_{0.2}$/MPa		δ_5/%	
		min	max	min	max	min	max
棒材	Y	478	596	304	508	15	24
	R	378	470	105	343	18.5	43.0

不同温度退火后材料的拉伸性能见图 4.6-26。

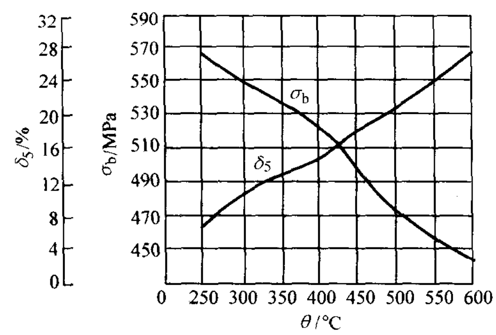


图 4.6-26　HMn60-3-1-0.75 拉制棒材的软化曲线

4) 弯曲性能见表 4.6-73。

表 4.6-73　棒材的弯曲度要求

品种	d/mm	弯曲度/mm·m⁻¹　≤
棒材	11 ~ 50 > 50 ~ 125	15 25

5) 弹性性能　弹性模量 E = 102.5 GPa。

(6) 工艺性能

1) 熔炼与铸造工艺　合金采用工频有芯感应电炉熔炼。合金脱氧性较好。但由于 Zn、Mn 的质量分数高，易造渣。熔炼时使用木炭和冰晶石熔剂覆盖。合金铸造热应力较大，采用烟灰覆盖，半连续铸造方式铸造。铸造温度 1 060℃左右。

2) 成形性能　合金热塑性较好，高温变形抗力小，具有很好的热挤压塑性；合金冷塑性较差，冷加工率不宜过大，且冷加工后残余应力较大，须及时退火，以防开裂。

3) 表面处理工艺　表面酸洗：酸洗液成分 20% ~ 25% H_2SO_4，酸洗时间 15 ~ 30 min。

4) 切削加工与磨削性能　合金具有良好的切削性能，可以满足冷成形应力状态很复杂的柱塞组件的收口工艺要求。

(7) 选用实例

该合金在航空工业主要用作液压泵转子、滑履等耐磨零部件。

编写：宋练鹏（中南大学）

第 7 章　耐磨铜合金

1　耐磨锡青铜

具有高耐磨性的锡青铜主要是含锡、锌、铅或磷的多元合金，元素锌除强化 α 铜 - 锡固溶体外，还改善合金的流动性，减小结晶温度范围，减轻反偏析的程度，提高合金的充型能力和补缩能力，有助于减轻疏松，提高耐水压性能。铅以单独相存在，呈黑色夹杂物分布于枝晶间，减少晶间显微缩孔的体积，有利于提高铸件的致密度，改善合金的耐磨性和切削性能。元素磷在铜中的溶解度很小，主要以（$\alpha + Cu_3P$）共晶的形式存在。Cu_3P 化合物有很高的硬度，显着地提高合金的力学性能，同时，元素磷还能显着地降低铜液的表面张力，提高熔体的流动性和充型能力。

这类合金具有较高的强度，良好的抗滑动摩擦性、优良的切削性和好的焊接性能，在大气、淡水中有良好的耐腐蚀性能。

1.1　锡青铜 QSn4-4-2.5

（1）牌号、品种规格与供应状态

材料牌号：锡青铜 QSn4-4-2.5。

相近牌号：БРОЦС 4-4-2.5（俄罗斯），C54400（美国），C5441（日本）。

品种规格与供应状态见表 4.7-1。

表 4.7-1　材料供应的规格及状态

δ/mm	0.8 ~ 1.0	0.8 ~ 5.0
供应状态	M、Y_3	M、Y_3、Y_2、Y
技术标准	GB/T 14596—1993	GB/T 2049—1980

（2）化学成分

1）QSn4-4-2.5 的化学成分见表 4.7-2。

表 4.7-2　QSn4-4-2.5 合金的化学成分

（质量分数）　　%

Sn	Zn	Pb	Cu	Fe	Sb	Bi	P	Al	杂质总和
				≤					
3.0 ~ 5.0	3.0 ~ 5.0	1.5 ~ 3.5	余量	0.05	0.002	0.002	0.03	0.002	0.2

2）合金组织结构　退火状态合金的组织由 α 固溶体和铅质点组成，铸态时呈现枝晶偏析、有少量（α + γ）共析体。

（3）物理及化学性能

1）物理性能　密度：$\rho = 9.0\ g/cm^3$；熔化温度范围：927 ~ 999℃；热导率：$\lambda = 83.7\ W/(m \cdot K)$；比热容：$c = 376\ J/(kg \cdot K)$；线胀系数：$\alpha = 18.0 \times 10^{-6}\ K^{-1}$（20℃），$\alpha = 19.0 \times 10^{-6}\ K^{-1}$（20 ~ 500℃）；电导率：$g = 19.8\%$ IACS；电阻率：$\rho = 0.087\ \mu\Omega \cdot m$。

2）化学性能　合金在大气、淡水和海水中有良好的化学稳定性，在不同介质中的腐蚀速度见表 4.7-3。

表 4.7-3　合金在不同介质中的腐蚀速度

介　质	θ/℃	腐蚀速度/mm·a⁻¹
天然海水	—	0.028
人造海水	20	0.031
	40	0.07
10%硫酸溶液	20	0.242
30%乙酸溶液	20	0.03
10%盐酸溶液	20	7.19

（4）热处理

合金不能热处理强化。退火：480 ~ 650℃。消除应力退火：200 ~ 290℃。

（5）力学性能

1）技术标准规定的性能见表 4.7-4。

表 4.7-4　技术标准规定的性能

品　种	状　态	δ/mm	σ_b/MPa	δ/%	HRB	技术标准
			≥			
带　材 板　材	M Y_3 Y_2	带 0.8 ~ 1.0 板 0.8 ~ 5.0	294 392 ~ 490 422 ~ 510	35 10 9	— 65 ~ 85 70 ~ 90	GB/T 14596—1993 GB/T 2049—1980
带　材	Y	0.8 ~ 1.0	490	5	—	GB/T 14596—1993
板　材	Y	0.8 ~ 5.0	510	5	—	GB/T 2049—1980

2）硬度　材料的室温硬度和高温硬度分别见表 4.7-5 和表 4.7-6。

表 4.7-5　材料的室温硬度

状　态	M	Y_2	Y
HBS	60	77	160

表 4.7-6　材料的高温硬度

θ/℃	100	200	300	500
HBS	59	50	50	45

3）拉伸性能　供应状态材料的拉伸性能见表 4.7-7。

表 4.7-7　供应状态材料的拉伸性能

品　种	状　态	σ_b/MPa		$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	
		min	max		min	max
板　材	M	295	335	130	41	63
	Y_3	420	480	—	10	22
	Y_2	440	490	—	11	16
	Y	540	620	275	5	11

不同变形率材料与不同温度退火后材料的拉伸性能分别

见图 4.7-1 和图 4.7-2。

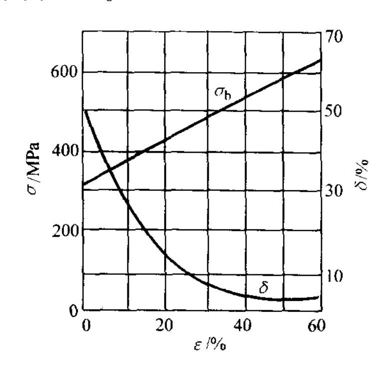


图 4.7-1　QSn4-4-2.5 拉伸性能与变形率的关系
原材料：δ4 mm 软板材

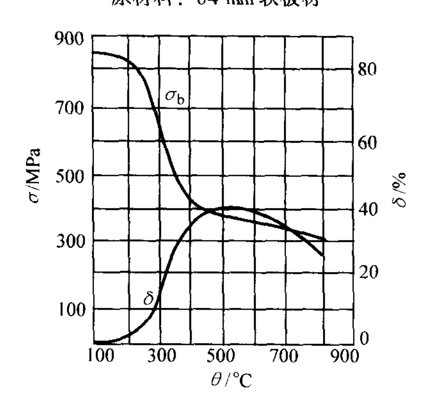


图 4.7-2　QSn4-4-2.5 拉伸性能与退火温度（保温 1 h）的关系
原材料：δ4 mm 硬板材

高温拉伸性能见表 4.7-8。

表 4.7-8　材料的高温拉伸性能

θ/℃	100	200	300	500
σ_b/MPa	320	295	320	270
δ/%	59	50	50	45

4）冲击性能见表 4.7-9。

表 4.7-9　材料的冲击性能

θ/℃	20	100	200	300	500
a_{KU}/kJ·m^{-2}	196	353	324	216	53

5）耐磨性能　摩擦因数 $\mu = 0.012$（有润滑剂）；$\mu = 0.20$（无润滑剂）。

6）弹性性能　弹性模量 $E = 103.4$ GPa；切变模量 $G = 38.6$ GPa。

（6）工艺性能

1）熔炼与铸造工艺　合金常用工频有芯感应电炉熔炼，熔体流动性较低、吸气性较强，熔炼时应使用经煅烧过的木炭覆盖，并在熔炼后期用磷铜脱氧。用铁模或无流铸造工艺浇注铸锭。当使用铁模浇注时，应在浇注前往模内添加少量全损耗系统用油，以改善铸锭的表面质量。浇注温度为 1 180～1 200℃。

2）成形性能　合金可以冷加工，总变形率为 50%，但不能热加工。

3）焊接性能　合金易于锡焊、铜焊、闪光电阻焊，能进行气体保护电弧焊，也可以气焊，但不能接触点焊和对焊。

4）切削加工与磨削性能　合金具有优良的切削性，宜进行高速和自动切削加工。合金的切削加工性为易切削黄铜 HPb63-3 的 80%。

（7）选用实例

合金主要用于制造航空、汽车及其他工业部门中承受摩擦的零件，如汽缸活塞销衬套、轴承和衬套的内衬、副连杆衬套、圆盘和垫圈等。

1.2　锡青铜 QSn4-4-4

（1）牌号、品种规格与供应状态

材料牌号：锡青铜 QSn4-4-4。

相近牌号：CuSn4Pb4Zn3（ISO），C54400（美国），БРОЦС4-4-4（俄罗斯），CuSn4Zn4Pb4（法国）。

品种规格与供应状态见表 4.7-10。

表 4.7-10　产品供应的规格及状态

品　种	δ/mm	供应状态
板　材	0.8～5.0	M，Y_3，Y_2，Y
带　材	>1.0～1.2	Y，Y_2

（2）化学成分

1）QSn4-4-4 的化学成分见表 4.7-11。

表 4.7-11　材料的化学成分（质量分数）　%

Sn	Zn	Pb	Cu	Al	Fe	Sb	Bi	P	杂质总和
				≤					
3.0～5.0	3.0～5.0	3.5～4.5	余量	0.002	0.05	0.002	0.002	0.03	0.2

2）合金组织结构　合金铸态高倍组织基体为 α 相，有大量铅相呈颗粒状均匀分布。

（3）物理及化学性能

密度：$\rho = 9.0$ g/cm^3；熔化温度范围：928～1 000℃；热导率：$\lambda = 83.7$ W/（m·K）；比热容 $c = 0.377$ kJ/（kg·K）；线胀系数：$\alpha = 18\times10^{-6}\cdot K^{-1}$（20～100℃），$\alpha = 19\times10^{-6}\cdot K^{-1}$（20～300℃）；电导率：体积测定法，20℃时为 19%IACS；电阻率：$\rho = 0.087$ μΩ·m（20℃）；耐腐蚀性能：在大气和淡水中具有良好的耐腐蚀性。

（4）热处理

退火 500～600℃。

（5）力学性能

1）技术标准规定的性能见表 4.7-12。

表 4.7-12　技术标准规定的性能

品种	状态	δ/mm	σ_b/MPa	δ_{10}/%	HRB	技术标准
板材	M	0.8～5.0	≥294	35	—	GB/T 2049—1980
	Y_3		392～490	10	65～85	
	Y_2		421～510	9	70～90	
	Y		510	5	—	
带材	Y_2	1.0～1.2	422～510	9	70～90	GB/T 14596—1993
	Y		490	5	—	

2）硬度　62HBS（M），160～180HBS（Y）。

3）拉伸性能见表 4.7-13。

表 4.7-13　材料的拉伸性能

合金状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_{10}/%	ψ/%
M	294～343	127	46	34
Y	539～637	274	2～4	—

4）冲击性能 $a_{KU}=358\ kJ/m^2$（M）。

5）摩擦性能 材料的摩擦因数见表4.7-14。

表4.7-14 材料的摩擦因数

合金状态	摩擦因数	
	有润滑剂	无润滑剂
M	0.016	0.26
Y	0.016	0.26

6）收缩率 合金凝固时的线收缩率为1.5%～1.6%。

7）弹性模量 $E=80$ GPa（Y）。

（6）工艺性能与要求

1）熔炼与铸造工艺 合金凝固温度范围较大，凝固时易产生成分偏析，吸氧性强，故熔炼时需充分脱氧。采用带震动半连续铸造和石墨结晶器。铸造温度1 200℃左右。

2）成形性能 合金具有良好的冷加工性能，变形程度小于或等于30%。一般不能进行热加工。

3）焊接性能 合金宜于进行软钎焊或硬钎焊；也可进行火花焊；一般不采用其他焊接方法。

4）切削加工与磨削性能 合金的切削加工性是易切削黄铜HPb63-3的90%。

（7）选用实例

合金主要用于制造承受摩擦的零件，如衬套、圆盘、轴套的衬垫等。

1.3 铸造锡青铜ZCuSn5Zn5Pb5

（1）牌号、品种规格与供应状态

材料牌号：铸造锡青铜ZCuSn5Zn5Pb5。

相近牌号见表4.7-15。

品种规格与供应状态：铸件和连铸棒。

（2）化学成分

1）ZCuSn5Zn5Pb5的化学成分见表4.7-16。

表4.7-15 材料的相近牌号

国别	俄罗斯	美国	英国	德国	日本	法国	ISO
牌号	БРОЦС 5-5-5	C83600	LG2	G-CuSn5ZnPb	BC6	CuPb5Zn5Sn5	CuPb5Sn5Zn5

表4.7-16 材料的化学成分（质量分数） %

Sn	Pb	Zn	Cu	Fe	Al	Ni	Si	S	P	杂质总和
				≤						
4.0～6.0	4.0～6.0	4.0～6.0	余量	0.3	0.01	2.5①	0.01	0.10	0.05	1.0

① 不计入杂质总和。

2）合金组织结构 铸态组织由α枝晶和分散的铅质点组成。

（3）物理及化学性能

密度：$\rho=8.79\ g/cm^3$；熔化温度范围：854～1 010℃；热导率：$\lambda=71$ W/(m·K)（15℃），$\lambda=90$W/(m·K)（200℃）；比热容：$c=377$ J/(kg·K)；线胀系数：$\alpha=19.62\times10^{-6}\ K^{-1}$（20～200℃）；电导率：$g=15\%$ IACS（15℃），$g=13\%$ IACS（200℃）；电阻率：$\rho=0.115\ \mu\Omega\cdot m$（15℃），$\rho=0.13\ \mu\Omega\cdot m$（200℃）。

磁性能：在磁场强度$H=700$ kA/m时，室温磁导率$\mu=1.0$。

耐腐蚀性能：合金对多种工厂气氛、乡村和海洋大气、淡水和海水有很高的化学稳定性，也能有效地耐石油、有机溶剂、亚硫酸盐以及一些干燥气体的腐蚀，但对汞化物、强氧化性酸类、湿的氨气，则腐蚀速度较快。

（4）热处理

合金不能热处理强化。消除应力退火：270～450℃。

（5）力学性能

1）技术标准规定的性能见表4.7-17。

表4.7-17 技术标准规定的性能

铸造方法	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	HB	技术标准
金属型、砂型	铸态	200	90	13	60	GB/T 1176—1987
连铸、离心	铸态	250	100	13	65	

2）硬度 室温硬度见表4.7-18。

表4.7-18 材料的室温硬度

铸造方法	砂型	金属型	连铸
HBS	60～75	65～75	60～80

3）拉伸性能 材料的室温拉伸性能和高温拉伸性能分别见表4.7-19和表4.7-20。

表4.7-19 材料的室温拉伸性能

铸造方法	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	ψ/%
砂型	铸态	175～245	90～117	12～25	20
金属型	铸态	95～261	110～140	6～15	—
连铸	铸态	280～340	100～140	13～35	

表4.7-20 材料的高温拉伸性能（砂型铸造）

θ/℃	37	93	148	204	232
σ_b/MPa	238	226	215	212	206
δ_5/%	31	27	26	26	26

4）压缩性能 压缩屈服强度$\sigma_{Pc0.1}=258$ MPa。

5）冲击性能 铸棒的冲击韧度见表4.7-21。

表4.7-21 铸棒的冲击韧度

θ/℃	−180	−74	20	200	300
a_{KU}/kJ·m^{-2}	15	18	26	20	18

6）摩擦性能 铸造合金的摩擦因数$\mu=0.16$（无润滑）。

7）持久和蠕变性能 高温持久性能和高温蠕变性能见表4.7-22。

表4.7-22 材料的高温持久性能和高温蠕变性能

状态	θ/℃	$\sigma_{0.1/10000}$/MPa	σ_{1000}/MPa
铸棒	232	70	106
	288	31	66

8) 疲劳性能 ZCuSn5Zn5Pb5 合金的 $\sigma-N$ 曲线见图 4.7-3。

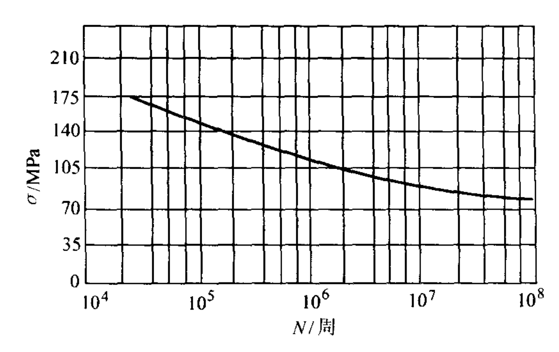


图 4.7-3 ZCuSn5Zn5Pb5 合金的 $\sigma-N$ 曲线

9) 弹性性能 弹性模量 $E=93.8$ GPa；切变模量 $G=35.2$ GPa；泊松比 $\mu=0.336$。

(6) 工艺性能

1) 熔炼工艺 合金通常采用感应电炉或坩埚炉在弱氧化气氛或在氧化气氛加覆盖剂保护条件下熔炼。使用经高温煅烧过的木炭或碎石墨块或硼砂（25%）和碎玻璃（5%）作覆盖剂。先熔化高熔点的铜，用磷铜预脱氧，然后加低熔点的锌、铅和锡。浇铸之前再添加少量磷铜，进一步脱氧和提高熔体的流动性。

2) 铸造工艺 铸造性能：该合金结晶温度范围宽（155℃），凝固时具有糊状结晶的特征；流动性较低（23～45 cm），补缩比较困难，易形成显微缩孔和疏松；但合金线收缩率低（1.3%），不形成大的集中缩孔。

铸造方法：该合金适于金属型、砂型、石墨型、离心铸造，也可以用水平连铸工艺方法铸造连续铸棒。但对批量生产的中小型铸件，以采用金属型浇铸为宜，以得到致密度高的铸造表面，有助于提高铸件的耐水压性和耐磨性。根据铸件断面尺寸大小控制浇注温度，小型薄型铸件为 1 150～1 200℃；大型铸件为 1 065～1 150℃。

3) 成形性能 合金仅用于铸造，不能热加工。在冷态下能变形 20%～30%。

4) 焊接性能 合金易于锡焊、钎焊、点焊，但不宜气焊、炭弧焊和气体保护电弧焊。

5) 切削加工与磨削性能 合金易切削加工，切削加工性为易切削黄铜 HPb63-3 的 84%。

(7) 选用实例

合金主要用于中等载荷滑动摩擦零件，如轴瓦、凸缘、阀门、泵零件以及管接头、配件等。

1.4 铸造锡青铜 ZCuSn6Zn6Pb3

(1) 牌号、品种规格与供应状态

材料牌号：铸造锡青铜 ZCuSn6Zn6Pb3。

相近牌号：见表 4.7-23。

表 4.7-23 合金的相近牌号

国别	俄罗斯	英国	法国	德国	日本
牌号	БРОЦС6-6-3	LG3	CuSn7Pb6Zn4	G-CuSn7ZnPb	BC7

品种规格与供应状态：铸件。

(2) 化学成分

1) ZCuSn6Zn6Pb3 的化学成分见表 4.7-24。

表 4.7-24 合金的化学成分（质量分数） %

Sn	Zn	Pb	Cu	杂质 ≤					
				Fe	Al	Sb	Si	P	杂质总和
5.0～7.0	5.0～7.0	2.0～4.0	余量	0.4	0.05	0.3	0.05	0.05	1.0

2) 合金组织结构 合金的铸态组织由 α 枝晶，少量的（α+δ）共析体和铅质点组成，充分退火后，共析体消失。

(3) 物理及化学性能

密度：$\rho=8.82$ g/cm³；熔化温度范围：液相点 976℃；热导率：$\lambda=63.0$ W/（m·K）；比热容：$c=376$ J/（kg·K）；线胀系数：$\alpha=17.1\times10^{-6}\cdot K^{-1}$（20～100℃），$\alpha=18.2\times10^{-6}\cdot K^{-1}$（20～300℃）；电导率：$g=11\%\sim12\%$ IACS；电阻率：$\rho=0.143\sim0.156$ $\mu\Omega\cdot m$。

耐腐蚀性能：合金在大气、淡水和海水中有好的耐蚀性。在 20℃的 10%硫酸溶液中每天的质量损失为 4.9g/（m²·d），在海水中为 0.67 g/（m²·d）。

(4) 热处理

合金不能热处理强化。消除应力退火：280℃，空冷。

(5) 力学性能

1) 技术标准规定的力学性能见表 4.7-25。

表 4.7-25 技术标准规定的性能

铸造方法	状态	σ_b/MPa	δ_5/%	HBS	技术标准
		≥			
砂型	铸态	175	8	60	GB/T 1176
金属型	铸态	195	10	65	—1987

2) 硬度见表 4.7-26。

表 4.7-26 合金的硬度

铸造方法	砂型	金属型	石墨型
HBS	67	65～72	95

3) 拉伸性能 室温拉伸性能见表 4.7-27。

表 4.7-27 合金的室温拉伸性能

铸造方法	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%
砂型	铸态	195	105	14
金属型	铸态	200	110	18
石墨型	铸态	355	160	36

4) 压缩性能 压缩屈服强度 $\sigma_{Pc0.2}=137.9$ MPa。

5) 冲击性能 冲击韧度 $a_{KU}=19$ kJ/m²（金属型）。

6) 扭转与剪切性能 抗剪强度 $\tau=215$ MPa（金属型）。

7) 耐磨性能 摩擦因数 $\mu=0.015$（有润滑剂）；$\mu=0.25$（无润滑剂）。部分磨损量数据见表 4.7-28。

表 4.7-28 40 mm×10 mm 试样同钢（HRC55）干磨 20 000 次（载荷 147 N）时的磨损量

铸造方法	熔模	金属型	压力铸造
磨损量/g	3.683	6.381	4.540

8) 持久和蠕变性能 高温持久性能和高温蠕变性能见表 4.7-29。

表 4.7-29 合金的高温持久性能和高温蠕变性能

θ/℃	$\sigma_{0.1/10000}$/MPa	σ_{1000}/MPa
232	62	—
288	31	46

9) 疲劳性能 砂型铸棒的 $\sigma_D=110$ MPa（N 为 10^8 周）。

10) 弹性性能 弹性模量 $E=90$ GPa（金属型）。

(6) 工艺性能

1) 熔炼 合金通常采用坩埚炉或感应电炉在弱氧化气

氛或在氧化气氛加覆盖剂保护条件下熔炼。使用经高温煅烧过的木炭或碎石墨块或硼砂（25%）和碎玻璃（75%）作覆盖剂。先熔化高熔点的铜，用磷铜预脱氧，然后加锌、铅和锡。浇铸之前用少量磷铜进一步脱氧和提高熔体的流动性。

2）铸造工艺 铸造性能：该合金结晶温度范围宽，凝固时具有糊状结晶的特征；流动性较低（1 200℃时为40 cm），补缩较困难，易形成显微缩孔和疏松；但合金线收缩率低（1.6%），不形成大的集中缩孔。

铸造方法：该合金适于砂型、金属型、离心铸造，也可以采用压力下结晶以及熔模精铸。对批量生产的中小型铸件，宜采用金属型浇注，以提高铸件表面层的致密性以及铸件的耐水压性、抗磨性。根据铸件壁厚控制浇注温度，对于薄壁铸件取1 150～1 220℃；厚壁铸件为1 065～1 150℃。

3）成形性能 合金仅作为铸造使用。

4）焊接性能 合金易于锡焊、钎焊和点焊，但不宜气焊、炭弧焊和气体保护电弧焊。

5）切削加工与磨削性能 合金易切削加工，切削加工性为易切削黄铜HPb63-3的80%。

（7）选用实例

用于在中等或较高的载荷及中等滑动速度下工作的轴承、衬套、附件及其他耐磨件。

1.5 铸造锡青铜ZCuSn10P1

（1）牌号、品种规格与供应状态

材料牌号：铸造锡青铜ZCuSn10P1。

相近牌号见表4.7-30。

表4.7-30 材料的相近牌号

国别	俄罗斯	美国	英国	日本	ISO
牌号	БРОФ10-1	C90700	PB1	PBC2B	CuSn10P

品种规格与供应状态：铸件。

（2）化学成分

1）材料的化学成分见表4.7-31。

表4.7-31 材料的化学成分（质量分数） %

Sn	P	Cu	Fe	Pb	Sb	S	Al	Ni	Si	Mn	杂质总和
			≤								
9.0～11.5	0.5～1.0	余量	0.1	0.25	0.05	0.05	0.01	0.1	0.02	0.05	0.75

2）合金组织结构 合金在室温下的显微组织为α枝晶+（α+δ）共析体+（δ+Cu3P）共晶体组成。

（3）物理及化学性能

密度：ρ = 8.75 g/cm³；熔化温度范围：831～1 000℃；热导率：λ = 47W（m·K）（15℃），λ = 59 W/(m·K)(200℃)；比热容：c = 396 J/（kg·K）；线胀系数见表4.7-32；电导率：g = 9%IACS（15℃），g = 8%IACS（200℃）；电阻率：ρ = 0.191 μΩ·m（15℃），ρ = 0.215 μΩ·m（200℃）。

表4.7-32 材料的线胀系数

θ/℃	20～100	20～200	20～300
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	17.1	18.3	19.0

耐腐蚀性能：合金在大气和淡水中有极好的腐蚀稳定性。在海水中也有良好的耐蚀性。在1%HCl和1%H_2SO_4水溶液中的腐蚀速度分别为7.36 g/（m²·d）和0.57 g/（m²·d）。

（4）热处理

合金不能热处理强化。消除应力退火：400～500℃，空冷。

（5）力学性能

1）技术标准规定的性能见表4.7-33。

表4.7-33 技术标准规定的性能

铸造方法	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	HBS	技术标准
		≥				
砂型	铸态	220	130	3	80	GB/T 1176—1987
金属型	铸态	310	170	2	90	
离心铸造	铸态	330	170	4	90	
连续铸造	铸态	360	170	6	90	

2）硬度见表4.7-34。

表4.7-34 材料的硬度

铸造方法	砂型	金属型	水冷模	压力结晶
硬度HB	80～100	120	100	105

3）拉伸性能 室温拉伸性能见表4.7-35。

表4.7-35 材料的室温拉伸性能

铸造方法	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_{10}/%
砂型	铸态	220～280	135	3～8
金属型	铸态	230～300	155	2～8
水冷模	铸态	360	—	13
压力结晶	铸态	365	—	13

4）压缩性能 压缩屈服强度$\sigma_{Pc0.2}$ = 151 MPa。

5）冲击性能 冲击韧度a_{KU} = 88 kJ/m²（金属型），a_{KU} = 59 kJ/m²（砂型）。

6）耐磨性能见表4.7-36。

表4.7-36 材料的耐磨性能

摩擦因数μ		磨痕长度/mm
有润滑剂	无润滑剂	
0.011 8	0.10	0.73

7）弹性性能 弹性模量E = 103.4 GPa；切变模量G = 36.6 GPa。

（6）工艺性能

1）熔炼工艺 合金通常采用坩埚炉或感应电炉在弱氧化气氛或在氧化气氛加覆盖剂保护条件下熔炼。使用经高温煅烧的木炭或碎石墨块作覆盖剂。坩埚和炉料要充分预热，快速熔化，尽量减少气体来源。用铜-磷脱氧，最后加锡，出炉浇注。

2）铸造工艺 铸造性能：合金结晶温度范围宽，凝固时有形成糊状结晶的特征；吸气性强，易与铸型中的水分发生铸型反应形成皮下气孔；合金熔体的流动性在1 200℃时为50 cm，线收缩率低（为1.44%），不形成大的集中缩孔。

铸造方法：该合金适于金属型、半金属型和干砂型铸造。根据铸件断面尺寸控制浇注温度，厚壁大型铸件为1 050～1 150℃；薄壁小型铸件为1 100～1 200℃。

3）成形性能 只作为铸造合金使用。

4）焊接性能 合金易于锡焊、铜焊和闪光焊，也能进行气体保护电弧焊和炭弧焊，但不宜电渣。

5）切削加工与磨削性能 合金的切削加工性为易切削黄铜HPb63-3的30%。

（7）选用实例

用于在高载荷（20 MPa以下）和高滑动速度（8 m/s以下）下工作的衬套、轴承、螺杆、齿轮以及使用温度不高于100℃的特种衬垫。

1.6　铸造锡青铜 ZCuSn10Zn2

（1）牌号、品种规格与供应状态

材料牌号：铸造锡青铜 ZCuSn10Zn2。

相近牌号：见表4.7-37。

表4.7-37　合金的相近牌号

国别	俄罗斯	美国	英国	德国	日本	ISO
牌号	БРОЦ.10-2	C90500	G1	G-CuSn10Zn	BC3	CuSn10Zn2

品种规模与供应状态：铸件。

（2）化学成分

1）ZCuSn10Zn2 的化学成分见表4.7-38。

表4.7-38　合金的化学成分（质量分数）　%

Sn	Zn	Cu	Fe	Pb	Sb	Ni	Al	Si	Bi	杂质总和
			≤							
9.0～11.0	1.0～3.0	余量	0.25	1.5①	0.3	2.0①	0.01	0.01	0.03	1.5

①　不计入杂质总和。

2）合金组织结构　合金在室温下由α相枝晶和（α+δ）共析体组成。共析体量与铸造时冷却速度有关，冷却速度愈快，共析体量愈多。

（3）物理及化学性能

密度：$\rho=8.70\ g/cm^3$；熔化温度范围：854～998℃；热导率：$\lambda=74.4$ W/（m·K）；比热容：$c=377$ J/（kg·K）；线胀系数：$\alpha=18.3\times10^{-6}\ K^{-1}$（20～500℃）；电导率：$g=11\%$IACS（15℃），$g=10\%$ IACS（200℃）；电阻率：$\rho=0.156\ \mu\Omega\cdot m$（15℃），$\rho=0.172\ \mu\Omega\cdot m$（200℃）。

耐腐蚀性能：合金在大气、淡水和海水中有高的化学稳定性，也能耐碱溶液和非氧化性酸溶液的腐蚀，但在有机酸类中腐蚀速度较快。合金在不同介质中的腐蚀速度见表4.7-39。

表4.7-39　合金在不同介质中的腐蚀速度

介质	海水	海雾	过热蒸汽（200℃）	10%硫酸溶液
24 h的质量损失/g·m⁻²	0.92	0.06	0.02	0.14

（4）热处理

合金不能热处理强化。消除应力退火：260～400℃，空冷。

（5）力学性能

1）技术标准规定的力学性能见表4.7-40。

表4.7-40　技术标准规定的性能

铸造方法	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	HBS	技术标准
		≥				
砂型	铸态	240	120	12	70	GB/T 1176—1987
金属型	铸态	245	140	6	80	
离心、连铸	铸态	270	140	7	80	

2）硬度见表4.7-41。

表4.7-41　合金不同状态的硬度

铸造方法	砂型	金属型	金属型①	连铸棒
HBS	75	80	90	92

①　经450℃，2 h退火。

3）拉伸性能　合金室温及高温拉伸性能分别见表4.7-42和图4.7-4。

表4.7-42　合金的室温拉伸性能

铸造方法	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_{10}/%
砂型	铸态	225	135	10
金属型	铸态	235	155	8
金属型	450℃，2 h退火	295	195	20
连铸棒	铸态	355	200	18

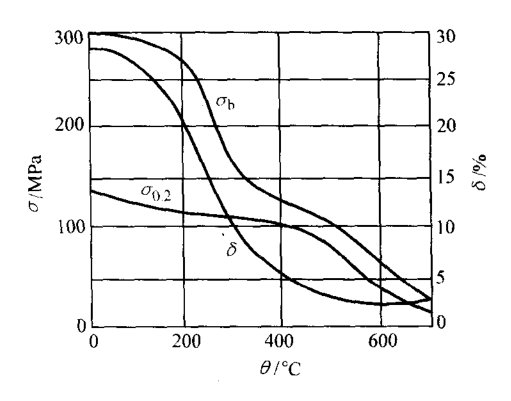


图4.7-4　ZCuSn10Zn2 的高温拉伸性能

4）压缩性能　压缩屈服强度 $\sigma_{Pc0.1}=275$ MPa。

5）冲击性能　冲击韧度 $a_{KU}=13.6\ kJ/m^2$。

6）耐磨性能　见表4.7-43。

表4.7-43　合金的耐磨性能

摩擦因数 μ		磨痕长度/mm
有润滑剂	无润滑剂	
0.012	0.20	0.59

7）高温蠕变性能　见表4.7-44。

表4.7-44　合金的高温蠕变性能

状　态	θ/℃	$\sigma_{0.1/10000}$/MPa
铸态	232	54
铸态	288	19

8）疲劳性能　循环次数 $N=10^8$ 周时，铸态试棒的疲劳强度 $\sigma_D=90$ MPa。

9）弹性性能　弹性模量 $E=113.4$ GPa（金属型）；切变模量 $G=44.1$ GPa（金属型）。

（6）工艺性能

1）熔炼工艺　合金通常用坩埚炉或感应电炉在弱氧化气氛或在氧化气氛加覆盖剂保护条件下熔炼。使用经高温煅烧过的木炭或碎石墨块或硼砂（25%）加玻璃（75%）熔剂覆盖。先熔化高熔点的铜，用磷铜预脱氧后加锌和锡。浇注之前用少量磷铜脱氧，提高熔体的流动性。

在浇注薄壁复杂的铸件时，要精确地控制合金的成分，为改善铸造性和气密性，锡含量取下限，而锌含量取上限。

2) 铸造工艺 铸造性能：该合金结晶温度范围宽(144℃)，凝固时具有较强的糊状结晶特征；合金的流动性低（1 200℃时为21 cm；1 150℃时为7 cm)，不利于补缩，容易形成显微缩孔和疏松，也易产生反偏析，但线收缩率低(仅为1.5%)，不形成大的集中缩孔。

铸造方法：该合金适于金属型、砂型、石墨型和离心铸造。无论采用何种铸造方式都应考虑促进铸件激冷的措施，以提高铸件的气密性。根据铸件壁厚和复杂程度控制浇注温度，复杂的薄壁铸件应采用较高的浇注温度，为1 100～1 200℃；厚壁大型铸件则为1 050～1 150℃。

3）成形性能 仅作为铸造合金使用。

4）焊接性能 合金易于锡焊、铜焊和闪光焊，也能进行气体保护电弧焊和炭弧焊，但不宜电渣焊。

5）切削加工与磨削性能 合金的切削加工性为易切削黄铜 HPb63-3 的30%。

(7）选用实例

航空工业用做活塞式发动机联杆和活塞的端衬套以及在中等载荷和在小滑动速度下工作的轴承、轴套、齿轮、活塞环和阀等摩擦组件。

2 铅青铜

具有高铅高锡含量的 ZCuPb10Sn10 和高铅低锡含量的 ZCuPb25Sn5均是三元系铸造铅青铜。元素 Pb 不溶于Cu-Sn合金，以单独质点相分布于枝晶间，可显著提高合金的耐磨性能和切削加工性，但使力学性能有所下降。添加元素锡能显著提高合金的强度，并改善合金的铸造工艺性能。合金兼有铅青铜和锡青铜的耐磨、导热、易切削加工、高的耐蚀性和强度特性。高铅锡青铜虽然强度较低，但更适于在润滑不良的条件下工作，在载荷为20 MPa，滑动速度为15 m/s的工作条件下有极好的耐磨性，合金的力学性能在300℃以下无大的变化。主要用于制造重载高速工作的耐磨零件。而低铅锡青铜适用于制造轻载、高速（50 m/s以下）和润滑不良条件下工作的耐磨零件，合金的工作温度不宜高于150～200℃。

2.1 铸造铅青铜 ZCuPb10Sn10

(1）牌号、品种规格与供应状态

材料牌号：铸造铅青铜 ZCuPb10Sn10。

相近牌号：见表4.7-45。

表4.7-45 材料的相近牌号（质量分数）

国别	俄罗斯	美国	英国	德国	法国	日本
牌号	БРОС10-10	C93700	LB2	G-CuPb10Sn10	CuPb10Sn10	LBC3

品种规格与供应状态：铸件。

(2）化学成分

1）ZCuPb10Sn10 的化学成分见表4.7-46。

表4.7-46 合金的化学成分（质量分数） %

Pb	Sn	Cu	杂质 ≤							
			Fe	Al	Sb	Si	P	Ni	Zn	杂质总和
8.0～11.0	8.0～11.0	余量	0.25	0.01	0.5	0.01	0.05	2.0①	2.0①	1.0

① 不计入杂质总和。

2）合金组织结构 合金在室温下铸态组织为α+（α+δ）共析体+Pb质点。α呈含锡量不均的枝晶，其间分布着脆硬的（α+δ）共析体和大量的质软的铅质点，当产生铅偏析时，铅呈块状分布。

(3）物理及化学性能

密度：$\rho=8.87\ g/cm^3$；熔化温度范围：779～947℃；热导率：$\lambda=47\ W/(m\cdot K)$（20℃），$\lambda=59\ W/(m\cdot K)$（200℃）；比热容：$c=376.8\ J/(kg\cdot K)$；线胀系数：$\alpha_1=19.0\times10^{-6}\ K^{-1}$（0～250℃）；电导率：$g=10\%$ IACS（20℃），$g=9\%$IACS（200℃）；电阻率：$\rho=0.172\ \mu\Omega\cdot m$（20℃），$\rho=0.191\ \mu\Omega\cdot m$（200℃）。

耐腐蚀性能：合金在大气、淡水和海水中有高的化学稳定性，也能耐碱溶液和非氧化性酸类溶液的腐蚀，但在有机酸中腐蚀速度较快。

(4）热处理

合金不能热处理强化。消除应力退火：260～300℃。

(5）力学性能

1）技术标准规定的力学性能见表4.7-47。

表4.7-47 技术标准规定的性能

铸造方法	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	HBS	技术标准
		≥				
砂型	铸态	180	80	7	65	GB/T 1176—1987
金属型	铸态	220	140	5	70	
连铸、离心	铸态	220	110	6	70	

2）硬度见表4.7-48。

表4.7-48 合金不同状态的硬度

铸造方法	砂型	金属型	连铸棒
HBS	65～85	80～90	87

3）拉伸性能见表4.7-49和图4.7-5。

表4.7-49 合金的室温拉伸性能

铸造方法	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	硬度 HB
砂型	铸态	190～270	80～130	5～18	65～85
金属型	铸态	220～280	140～200	3～12	80～90
连铸	铸态	280～390	160～220	6～15	80～90
离心	铸态	230～310	140～190	5～10	80～90

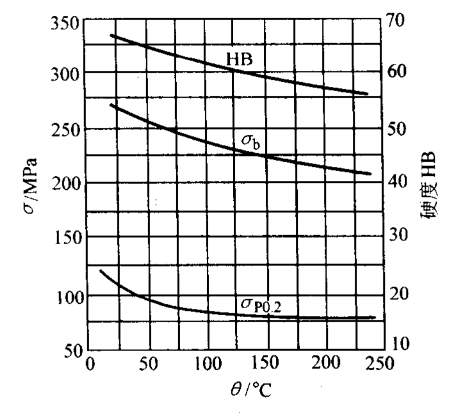


图4.7-5 材料的高温拉伸性能

4）压缩性能 压缩屈服强度 $\sigma_{P0.1}=90$ MPa（金属型）；$\sigma_{P0.2}=145$ MPa（砂型）。

5）冲击性能 冲击韧度 $a_{KU}=88\ kJ/m^2$（金属型）。

6）扭转与剪切性能 抗剪强度 $\tau=124$ MPa（砂型）。

7）耐磨性能见表4.7-50。

8）高温蠕变性能见表4.7-51。

表 4.7-50　合金的耐磨性能

摩擦因数		合金痕长度/mm
有润滑剂	无润滑剂	
0.012	0.20	0.59

表 4.7-51　合金的高温蠕变性能

θ/℃	176	232	287
$\sigma_{0.1/10000}$/MPa	72	58	14

9）疲劳性能　砂型铸棒在循环次数 $N=10^8$ 周时，疲劳强度 $\sigma_D=90$ MPa。

10）弹性性能　弹性模量 $E=75.8$ GPa；切变模量 $G=27.6$ GPa；泊松比 $\mu=0.373$。

（6）工艺性能

1）熔炼工艺　合金宜在弱氧化气氛下，使用经煅烧过的木炭或碎石墨覆盖，用坩埚炉或感应电炉熔炼。高熔点的铜熔化后用磷铜预脱氧，再加铅和锡。浇注之前应充分搅拌并添加少量磷铜，以使铅分布均匀和提高熔体的流动性。

2）铸造工艺　铸造性能：该合金结晶温度范围为88℃，凝固时有糊状结晶的倾向；合金流动性相对较好，有利于充型；线收缩率低（1 150℃时为1.37%），不形成大的集中缩孔。铅几乎不溶于铜，容易产生铅的偏析。

铸造方法：为避免浇注时产生铅偏析，应选用能够激冷和造成顺序凝固条件的铸造方法。该合金适于金属型、半金属型、水冷模和熔模铸造，大型件采用离心铸造。根据铸件断面尺寸大小控制浇注温度。小型薄壁铸件为 1 110～1 200℃；大型厚壁铸件为 1 030～1 150℃。

3）成形性能　仅作铸造合金使用。

4）焊接性能　合金易于锡焊、钎焊和电阻焊，但不宜进行氧炔焰气焊、碳弧焊和气体保护电弧焊。

5）切削加工与磨削性能　合金有优良的切削加工性，切削加工性为易切削黄铜 HPb63-3 的 80%。

（7）选用实例

该合金主要用作在高载荷和高速下工作的摩擦零件，燃油泵、煤油泵、水泵的衬套、封严盘、垫圈、套管、轴承等。

2.2　铸造铅青铜 ZCuPb25Sn5

（1）牌号、品种规格与供应状态

材料牌号：25-5 铸造铅青铜 ZCuPb25Sn5。

相近牌号：见表 4.7-52。

表 4.7-52　合金的相近牌号

国别	俄罗斯	美国	英国	德国	日本
牌号	БРОС 5-25	C94300	LB5	G-CuPb20Sn	LBC5

品种规格与供应状态：铸件。

（2）化学成分

1）ZCuPb25Sn5 的化学成分见表 4.7-53。

表 4.7-53　合金的化学成分（质量分数）　%

Pb	Sn	Cu	Fe	Al	Sb	Si	P	S	Bi	Mg	杂质总和
			≤								
8.0～11.0	8.0～11.0	余量	0.2	0.02	0.3	0.02	0.08	0.05	0.005	0.02	1.0

2）合金组织结构　铅不溶入铜，合金铸态组织由 α 枝晶和分布其间的铅质点组成。

（3）物理及化学性能

密度：$\rho=9.20$ g/cm^3；熔化温度范围：899℃；热导率：$\lambda=58.7$ W/(m·K)（20℃）；线胀系数：$\alpha=18.0\times10^{-6}$ K^{-1}（20～100℃），$\alpha=19.3\times10^{-6}$ K^{-1}（20～300℃）；电导率：$g=14.8\%$IACS（20℃）；电阻率 $\rho=0.116$ μΩ·m。

耐腐蚀性能：合金在大气、淡水和汽油中有良好的耐蚀性。

（4）热处理

合金不能热处理强化。消除应力退火：260～300℃。

（5）力学性能

1）技术标准规定的性能见表 4.7-54。

表 4.7-54　技术标准规定的性能

铸造方法	状态	σ_b/MPa	δ_5/%	HBS	技术标准
		≥			
砂型	铸态	135	4	45	GB/T 1176—1987
金属型	铸态	147	6	55	

2）硬度　45～65HBS（砂型）；55～70HBS（金属型）。

3）拉伸性能　室温拉伸性能见表 4.7-55。

表 4.7-55　合金的室温拉伸性能

铸造方法	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_{10}/%
砂型	铸态	115～160	60～80	5～8
金属型	铸态	145～170	80～110	5～12

4）压缩性能　抗压强度 $\sigma_{bc}=392$ MPa（金属型）；压缩屈服强度 $\sigma_{P0.1}=65\sim76$ MPa（砂型）。

5）冲击性能　冲击韧度 $a_{KU}=88$ kJ/m^2（砂型和金属型）。

6）扭转与剪切性能　抗剪强度 $\tau=145$ MPa（金属型）。

7）摩擦因数　$\mu=0.008$（有润滑剂）；$\mu=0.14$（无润滑剂）。

8）弹性性能　弹性模量 $E=73.5$ GPa（砂型），$E=78.5$ GPa（金属型）；切变模量 $G=27$ GPa（砂型）；泊松比 $\mu=0.361$。

（6）工艺性能

1）熔炼工艺　该合金熔炼时有低的造渣性和中等的吸气性。宜在弱氧化气氛条件下用坩埚炉或感应电炉熔炼，使用经煅烧过的木炭或碎石墨块覆盖。

高熔点的铜熔化后用磷铜脱氧，再加入锡和铅。浇注之前再添加少量磷铜并充分搅拌，以使铅分布均匀。

2）铸造工艺　铸造性能：合金的线收缩率小（为1.5%），不形成大的集中缩孔；在 1 070℃用砂型浇注的金属流动性为 40 cm；结晶温度较宽，有糊状结晶倾向；合金熔体易产生分层，富铜的枝晶凝固后，直至 326℃，富铅的熔体才凝固，易产生铅的偏析。

铸造方法：为避免铸件的铅偏析，浇注时应采用快速冷却的工艺措施，如使用冷铁和喷水冷却。采用金属型、水冷模、干砂型较为适宜。浇注温度为 1 050～1 100℃。

3）成形性能　仅作铸造合金使用。

4）焊接性能　合金软钎焊性能良好，硬钎焊性能不好。不宜进行氧炔焊、碳弧焊、气体保护电弧焊及有药皮金属极电弧焊。

5）切削加工与磨削性能　合金有优良的切削性能，切削加工性为易切削黄铜 HPb63-3 的 80%。

（7）选用实例

合金适用于在 200℃以下、高速滑动工作的摩擦组件，如：轴承、衬套、套管、滑块以及水泵、燃料泵的零件等。在润滑不好的情况下，仍有很好的磨合性。

3 汽车同步器齿环用耐磨铜合金简介

同步器齿环是汽车变速系统的关键零部件，用于制造同步器齿环的材料要求具有高的热塑性、强度、耐磨性和切削性等综合性能，其中耐磨性是衡量同步器齿环质量的最重要性能指标。由于铜合金具有优良的减摩和耐磨性能，目前国内外普遍选用复杂锰黄铜和复杂铝黄铜等生产汽车同步器齿环，其中一些生产厂家及所用材料见表 4.7-56。

表 4.7-56 国内外汽车同步器齿环用耐磨铜合金

合金牌号	生产厂家及应用车型
P31B	日本中越合金工业株式会社 载货车齿环专用材
CSM-3	日本中越合金工业株式会社 重型载货车齿环专用材
MBA2	日本三菱金属工业公司 微型车、轿车专用材
MBA4	日本三菱金属工业公司 轻型车专用材
CuZn40Al2	德国大众（VOLKSWAGEN）汽车公司 专用材
CuZn40Al5Mn	
S-M2A4502-A	美国博格华纳（BORGWARNER）公司 专用材
DIEHL466	意大利依维柯（IVECO）专用材
R311	法国雷诺（RENAULT）汽车专用材
HMn59-2-1-0.5	国内部分车型选用
HMn62-3-3-0.7	
HMn60-2-1-1	
HAl61-4-3-1	
HAl63-3-1	
HAl65-5-4-3	

在这些合金中，通过添加微量元素和采取相应的工艺措施，控制材料中耐磨质点的生成，使硬质第二相主体由 Mn_5Si_3 构成，并控制其数量、形态和分布，促使基体 α 相增多，并造成较多的合金元素（如 Al，Ni，Co 等）在其中的溶解，强化和细化基体晶粒组织，提高材料的塑性和强度，使材料的裂纹扩展减缓，使 α 相呈方向性且均匀分布，在磨损过程中，有利于释放裂纹扩展的应力，减缓了产品的磨损。在使用过程中产品表层会形成致密高硬氧化物或化合物，从而由严重的黏着磨损向氧化磨损转化，大大降低了材料的磨损，提高了材料的耐磨性。

3.1 牌号和化学成分

汽车同步器齿环用耐磨铜合金的牌号和化学成分见表 4.7-57。

表 4.7-57 汽车同步器齿环用耐磨铜合金的化学成分（质量分数） %

合金牌号	Cu	Al	Mn	Si	Fe	Sn	Ni	Pb	Co	Zn
P31B	余量	3.5~4.5	—	0.5~1.5	0.3~1.3	—	2.5~4.0	—	0.5~1.0	26~32
CSM-3	余量	0.5~1.5	1.5~2.5	0.5~1.5	<0.35	—	<0.2	<0.3	—	34~38
MBA2	60~64	1.5~3.5	2.0~4.0	0.5~2.0	≤0.35	—	≤1.0	≤1.0	—	余量
MBA4	61~65	5.5~6.5	2.0~3.5	<0.1	<0.1	<0.2	<1.5	—	0.1~3.0	余量
CuZn40Al2	58~59	1.4~1.9	1.8~2.2	0.6~0.9	0.35~0.65	0.1~0.4	≤0.2	0.3~0.6	—	余量
CuZn40Al5Mn	63.5~65.5	4.5~6.0	3.0~5.0	≤0.5	2.0~3.0	≤0.25	≤0.5	0.2~1.0	—	余量
S-M2A4502-A	55~58	1.3~2.2	1.0~2.4	0.2~0.8	≤0.8	≤0.5	≤2	≤0.8	—	余量
DIEHL466	64~65	5.3~5.8	4.0~5.0	0.3~0.6	2.5~3.0	—	0.3~0.6	0.1~0.4	—	余量
R311	57~60	1.5~2.0	2.0~4.0	0.6~0.9	0.1~0.25	—	—	0.1~0.35	—	余量
HMn59-2-1-0.5	58~59	1.4~1.7	1.8~2.2	0.6~0.9	0.3~0.7	0.1~0.4	<0.2	0.3~0.6	—	余量
HMn60-2-1-1	59~61	0.5~1.5	1.2~2.5	0.5~1.5	—	—	—	0.3	—	余量
HMn62-3-3-0.7	61~63	2.4~3.4	2.7~3.7	0.5~1.0	≤0.1	≤0.1	—	≤0.05	—	余量
HAl61-4-3-1	59~61	3.5~4.5	—	0.5~1.5	0.3~1.3	—	2.5~4.0	—	0.5~1.0	余量
HAl63-3-1	62~65	2.8~3.6	2.5~3.2	0.7~1.2	0.5~1.2	—	—	—	—	余量
HAl65-5-4-3	64~67	5.0~6.0	4.0~5.0	0.3~0.6	2.0~3.0	—	0.3~0.6	0.2~0.5	—	余量

3.2 力学性能

1）合金的硬度和拉伸性能　部分合金的力学性能见表4.7-58。

表 4.7-58　汽车同步器齿环用耐磨铜合金的力学性能

合金牌号	σ_b/MPa	δ_5/%	HBS
HMn59-2-1-0.5	570～610	16～19	160～190
HMn60-2-1-1	450～580	12～16	150～170
HMn62-3-3-0.7	520～680	9.0～10.5	160～190
HAl61-4-3-1	650～750	5.0～12	190～230
HAl63-3-1	550～650	11～14	165～180
HAl65-5-4-3	571～611	16～19	163～187

2）合金的耐磨性　合金的磨损值为0.6～0.8 mm。

3.3 工艺性能

合金采用工频有芯感应电炉熔炼，熔炼时需加覆盖剂保护，半连续铸造或水平连续铸造。可以进行锻造或挤压加工。

编写：宋练鹏（中南大学）

第 8 章　耐蚀铜合金

耐蚀铜合金主要包括含砷缓蚀海军黄铜、铝黄铜、锰黄铜、普通白铜、复杂白铜、蒙乃尔合金等。其基本性能特点是具有高的耐蚀性和抗氧化性、良好的力学性能，主要用于制造耐腐蚀导管、高压网及其他在高温和腐蚀介质中工作的零件。

1　白铜

以镍为主要合金元素的铜合金称为白铜。以 Cu-Ni 合金为基础加入第三元素如 Zn、Mn、Al 等的白铜，相应地称为锌白铜、锰白铜、铝白铜等。这类材料具有优良的耐蚀性和中等以上的强度，弹性好，易于热、冷压力加工，易于焊接，因而被广泛用于制造耐蚀的结构件和弹簧、插接件等。

白铜分为 5 组：普通白铜、铁白铜、锰白铜、锌白铜、铝白铜。锡、铍、钛、硅、碳、铬、锆、硼及硫、磷、砷、锑、铋等都是白铜中的杂质，含量应控制在一定的标准范围内。

1.1　白铜的牌号和分类

应符合 GB/T 5231—2001《加工铜及铜合金化学成分和产品形状》的规定，见表 4.8-1。

1.2　化学成分

白铜的化学成分见表 4.8-2。

表 4.8-1　白铜牌号分类

组别	序号	名称	牌号	产品形状	规格/mm	供应状态
普通白铜	1.	0.6 白铜	B0.6	线		
	2	5 白铜	B5	管、棒		
	3	25 白铜	B25	板		R（热轧）、M、Y
	4	30 白铜	B30	板、管、线		R（热轧）、M、Y
	5	19 白铜	B19	板、带		R（热轧）、M、Y
铁白铜	6	5-1.5-0.5 铁白铜	BFe5-1.5-0.5	管		
	7	10-1-1 铁白铜	BFe10-1-1	板、管		
	8	30-1-1 铁白铜	BFe30-1-1	板、管		
锰白铜	9	3-12 锰白铜	BMn3-12	板、带、线		软态
	10	40-1.5 锰白铜	BMn40-1.5	板、带、箔、 棒、线、管		硬态 软态
	11	43-0.5 锰白铜	BMn43-0.5	线		
锌白铜	12	15-21-1.8 锌白铜	BZn15-21-1.8	板、带		
	13	15-24-1.5 锌白铜	BZn15-24-1.5	棒		
铝白铜	14	13-3 铝白铜	BAl13-3	棒		Y
	15	6-1.5 铝白铜	BAl6-1.5	板	厚 0.5 ~ 12.0 宽 100 ~ 600	Y

表 4.8-2　白铜的化学成分（质量分数）　%

牌号	Ni + Co	Fe	Mn	Zn	Pb	Al	Si	P	S	C	Mg	Sn	As	Sb	Cu	杂质总和
B0.6	0.57 ~ 0.63	0.005	—	—	0.005	—	0.002	0.002	0.005	0.002	—	—	—	—	余量	0.1
B5	4.4 ~ 5.0	0.20	—	—	0.01	—	—	0.01	0.01	0.03	—	—	—	—	余量	0.5
B25	24.0 ~ 26.0	0.5	0.5	0.3	0.005	—	0.15	0.01	0.01	0.05	0.05	0.03	—	—	余量	1.8
B19	18.0 ~ 20.0	0.5	0.5	0.3	0.005	—	0.15	0.01	0.01	0.05	0.05	—	—	—	余量	1.8
B30	29 ~ 33	0.9	1.2	—	0.05	—	0.15	0.006	0.01	0.05	—	—	—	—	余量	—
BFe5-1.5-0.5	4.8 ~ 6.2	1.3 ~ 1.7	0.30 ~ 0.8	1.0	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	余量	—
BMn3-12	2.0 ~ 3.5	0.20 ~ 0.50	11.5 ~ 13.5	—	0.020	0.2	0.1 ~ 0.3	0.005	0.020	0.05	0.03	—	—	—	余量	0.7
BMn40-1.5	39.0 ~ 41.0	0.50	1.0 ~ 2.0	—	0.005	—	0.10	0.005	0.02	0.10	0.05	—	—	—	余量	0.9
BMn43-0.5	42.0 ~ 44.0	0.15	0.10 ~ 1.0	—	0.002	—	0.10	0.002	0.01	0.10	0.05	—	—	—	余量	0.6

续表 4.8-2

牌号	Ni + Co	Fe	Mn	Zn	Pb	Al	Si	P	S	C	Mg	Sn	As	Sb	Cu	杂质总和
BZn15-20	13.5 ~ 16.5	0.5	0.3	余量	0.02	—	0.15	0.005	0.01	0.03	0.05	0.002（Bi）	0.010	0.002	62.0 ~ 65.0	0.9
BZn15-21-1.8	14.0 ~ 16.0	0.3	0.5	余量	1.5 ~ 2.0	—	0.15	—	—	—	—	—	—	—	60.0 ~ 63.0	0.9
BZn15-24-1.5	12.5 ~ 15.5	0.25	0.05 ~ 0.5	余量	1.4 ~ 1.7	—	—	0.02	0.005	—	—	—	—	—	58.0 ~ 60.0	0.75
BAl13-3	12.0 ~ 15.0	1.0	0.50	—	0.003	2.3 ~ 3.0	—	0.01	—	—	—	—	—	—	余量	1.9
BAl6-1.5	5.5 ~ 6.5	0.50	0.20	—	0.003	1.2 ~ 1.8	—	—	—	—	—	—	—	—	余量	1.1

2 普通白铜

普通白铜是 Cu 与 Ni 形成的连续固溶体，具有面心立方晶格。温度低于 322℃时，存在一个亚稳分解的相当宽的成分 - 温度区域，向 Cu-Ni 合金添加第三元素诸如 Fe、Cr、Sn、Ti、Co、Si、Al 等，可改变亚稳分解的成分 - 温度区域范围和位置，同时也可改善合金的某些性能。白铜除做结构材料外，另一类重要的应用是高电阻合金和热电偶合金。

普通白铜的牌号主要有：B0.6、B5、B19、B25、B30。

2.1 化学成分

普通白铜的化学成分见表 4.8-2。

2.2 物理及化学性能

1）普通白铜的物理性能　见表 4.8-3 和表 4.8-4。

表 4.8-3　普通白铜的物理性能

性能	合金牌号			
	B0.6	B5	B19	B30
液相点/℃	1 085.5	1 121.5	1 191.7	1 228.7
固相点/℃	—	1 087.5	1 131.5	1 172.6
密度/g·cm^{-3}	8.96	8.7	8.9	8.9
比热容（20℃）/J·（kg·K）$^{-1}$	—		378	387
线胀系数（20℃）/10^{-6}K^{-1}	—	16.4	16	15.3
热导率（20℃）/W·（m·K）$^{-1}$	272.14	130.0	38.5	36.8 ~ 37.3
电阻率（20℃）/μΩ·m	0. 31	0.70	0.289	—
电阻温度系数 α_P/K^{-1}	0.002 758（0℃） 0.003 147（20℃）	—	0.000 29（100℃） 0.000 199（300℃） 0.000 127（500℃）	—
弹性模量 E/GPa	120	—	140	150

表 4.8-4　B0.6 白铜的高温电学性能与热电性能

温度/℃	冷端为 0℃时与铂配对的热电势/mV	电阻率 ρ/μΩ·m	电阻温度系数 /K^{-1}
0	0	0.299	0.002 758
10	—	0.241	0.003 147
100	+0.12	0.30	—
200	-0.61	—	—
300	-1.36	—	—
400	-2.17	—	—
500	-3.17	—	—

2）普通白铜的化学性能　B19 和 B30 在不同介质中的腐蚀速度见表 4.8-5 和表 4.8-6。

B30 白铜在 50℃的 10%H_2SO_4 溶液中和 10% HNO_3 溶液中的腐蚀速度分别见图 4.8-1 和图 4.8-2。

表 4.8-5　B19 在不同介质中的腐蚀速度

介质	温度/℃	浓度/%	腐蚀速度/mm·a^{-1}
工业大气	—	—	0.002 2
海洋大气	—	—	0.001
农村大气	—	—	0.000 35
淡水	—	—	0.03
海水	—	—	—
蒸气冷凝水	—	—	0.1
蒸气冷凝水	—	含 30% CO_2	—
水蒸气	—	干的和湿的	—
硝酸	—	50	—
盐酸	—	2 mol	—
盐酸	20	1	0.3
盐酸	20	10	0.8
硫酸	20	10	0.1
亚硫酸	—	饱和	2.6
氢氟酸	110	38	0.9

续表 4.8-5

介质	温度/℃	浓度/%	腐蚀速度/mm·a⁻¹
氢氟酸	38	98	0.05
无水氢氟酸	—	—	0.13
磷酸	20	8	0.58
醋酸	20	10	0.028
柠檬酸	20	5	0.02
酒石酸	20	5	0.019
脂肪酸	100	60	0.066
氨水	30	7	0.5
苛性钠	100	10~15	0.13

表 4.8-6 B30 白铜在氯化钠溶液中的腐蚀速度

介质	温度/℃	流速/$m \cdot s^{-1}$	质量损失 /$g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$	腐蚀速度 /$mm \cdot a^{-1}$
3% NaCl	40 40~50	静止 8~11	0.013 23 0.019 3	0.010 2 0.019

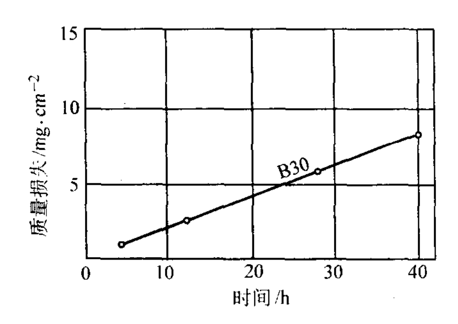


图 4.8-1 B30 白铜在 50℃的 10% H_2SO_4 溶液中的腐蚀速度

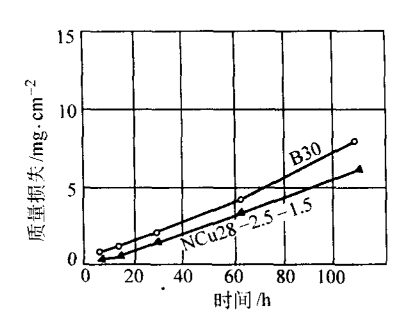


图 4.8-2 B30 白铜在 50℃的 10% HNO_3 溶液中的腐蚀速度

2.3 力学性能

1) 相关标准规定的性能 精密机械、化学和医疗器械等工业部门用的普通白铜板材的力学性能见表 4.8-7。

表 4.8-7 普通白铜板材的力学性能

牌号	状态	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%
		≥	
B5	软	215	32
	硬	375	10
B19	热轧	295	30
	软	390	3
B25	热轧	345	15
	软	375	23
	硬	540	3

2) 普通白铜典型的力学性能 见表 4.8-8~表 4.8-12 和图 4.8-3~图 4.8-8。

表 4.8-8 普通白铜的典型力学性能

性能	B0.6	B5	B19	B30
抗拉强度 σ_b（软状态）/MPa	250~300	270（板）	400	380
（硬状态）/MPa	450（加工率 80%）	470（板）	800（加工率 80%）	—
伸长率 δ（软状态）/%	<50	50（板）	35	23
（硬状态）/%	2（加工率 80%）	4（板）	5（加工率 60%）	—
比例极限	—	—	100（软状态）	—
屈服强度	—	—	600（硬状态）	—
布氏硬度 HB①	50~60	38（软状态）	70（软状态）	—

① 硬状态（加工率 70%）为 128。

表 4.8-9 B19 白铜的低温力学性能

温度 θ/℃	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	断面收缩率 ψ/%
20	361	194	26	78
-10	394	201	28	77
-40	418	203	29	77
-80	432	204	29	76
-120	464	205	28	75
-180	516	228	36	72

表 4.8-10 B30 白铜的高温力学性能

温度 θ/℃	弹性模量 E/GPa	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	断面收缩率 /ψ/%
20	150	373	147	41	75
200	150	324	129	37	73
300	150	293	121	35	65
400	145	248	106	19	15
550	145	179	95	16	15

表 4.8-11 B19及B30白铜的疲劳强度

合金状态	抗拉强度 σ_b/MPa	在规定循环周次的疲劳强度 σ_N/MPa			
		10^5	10^6	10^7	10^8
B19：退火（760℃，1h）	—	168	154	133	126
在245℃退火3 h，消除内应力	—	245	210	189	182
ϕ25.4 mm冷轧棒材	349	—	—	126	123
ϕ1.63 mm，冷拉88%的线材	590	371	287	238	238
B30：退火	410	203	—	—	175
冷拉33%的线材	—	—	301	252	245
厚0.63 mm退火带材	—	—	259	189	182
ϕ25.4 mm冷拉棒材	611	—	—	245	231
ϕ1.63 mm，冷拉88%的线材	673	413	308	245	245

表 4.8-12 B30白铜的蠕变强度及持久强度

合金状态	试验温度/℃	蠕变强度/MPa			持久强度 σ_{1000}/MPa
		1/1 000 000	1/1 00 000	1/10 000	
退火（晶粒大小0.25 mm）	150	168	—	—	—
	260	112			
退火（晶粒大小0.040 mm）	245	—	—	—	343
	316				308
	427				196
冷拉及消除内应力	260	—	413	—	—
	315		343	—	—
	393		119	266	392
	454		42	119	280
	510		—	28	210

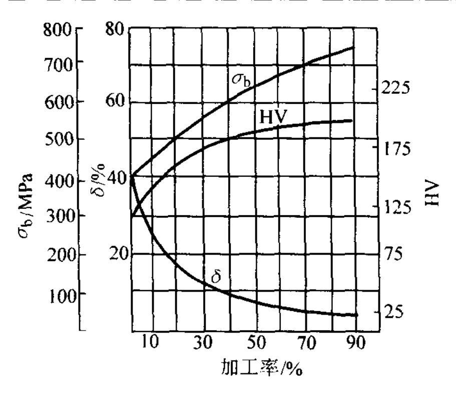


图 4.8-5 原加工率60%的在800℃退火1.5 h的B30白铜的力学性能与加工率的关系

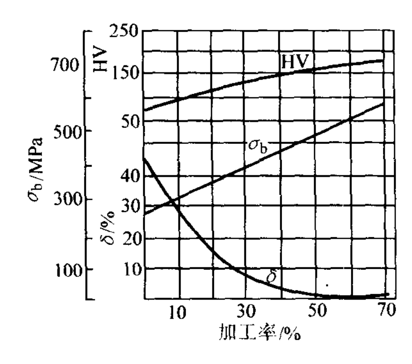


图 4.8-3 厚1 mm的B5白铜的力学性能与加工率的关系

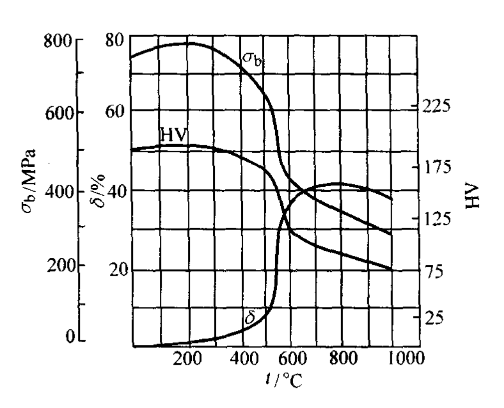


图 4.8-6 冷加工率90%的B30白铜的力学性能与退火温度（保温1 h）的关系

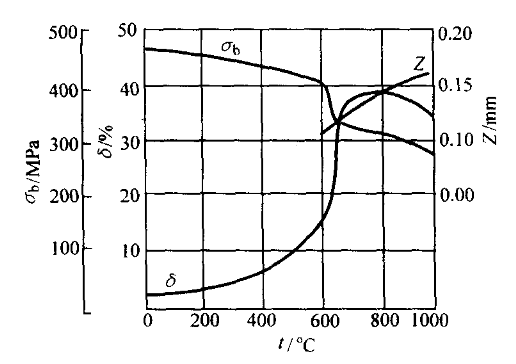


图 4.8-4 0.5 mm厚的B19白铜的力学性能与退火温度（保温40 min）的关系

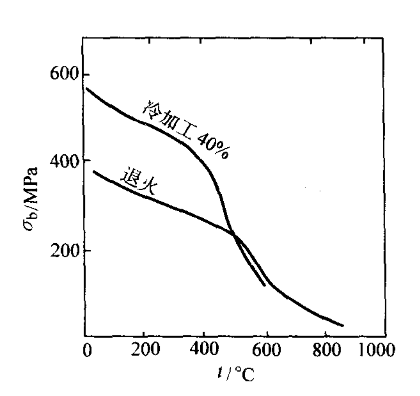


图 4.8-7 B30白铜的短时高温抗拉强度

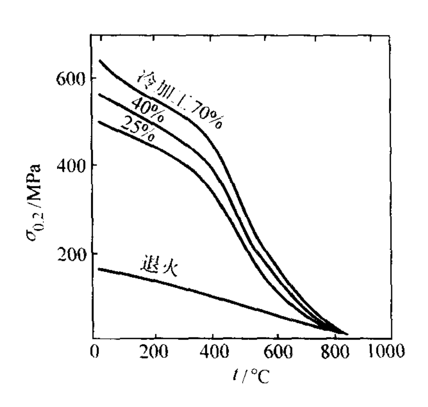


图 4.8-8 B30 白铜的短时高温屈服强度

3 锌白铜

若在铜-镍二元系合金中添加第三元素锌，则得到一系列具有美观银白色的锌白铜合金。锌在 Cu-Ni 合金固溶体中的溶解度相当大，有较大的固溶强化作用。当 Ni 含量相同时，提高合金的锌含量会增强合金抗大气腐蚀的能力。实际工业应用范围的锌白铜，一般含 5%～18%Ni 和 43%～72% Cu，其余为 Zn，它们的耐蚀性、弹性与强度均高。Ni 含量一般不超过 20%，这是合金使用工艺技术性能和经济成本综合评定的结果。

锌白铜以其优良的研磨性、钎焊性和抗应力松弛能力，较高的强度和弹性，良好的耐蚀性能，且易于电镀、热冷加工等技术工艺性能被广泛应用于制造耐蚀性结构件，诸如各种精密仪器仪表、高级电子元器件的弹簧、插口、罩壳等多种零部件。而含少量铅的锌白铜的切削性及冷加工性好，大量用于钟表、光学仪器等制作精密零件。此外，锌白铜在乐器、餐具、眼镜框架及装饰工程等方面亦有广阔市场。

锌白铜的主要牌号有 BZn15-20、BZn15-21-1.8、BZn15-24-1.5 等。

3.1 化学成分

锌白铜的化学成分见表 4.8-2。

3.2 物理性能（表 4.8-13）

表 4.8-13 锌白铜 BZn15-20 的物理性能

性能	数据
液相点℃	1 081.5
比热容/J·(kg·K)$^{-1}$	399
线胀系数 α (20～100℃) /$10^{-6}K^{-1}$	16.6
热导率 (20℃) /W·/(m·K)$^{-1}$	25.2～35.7
密度/g·cm^{-3}	8.70
电阻率 (20℃) /μΩ·m	0.26
电阻温度系数/K^{-1}	2×10^{-4}
弹性模量/GPa	126～140

3.3 力学性能（表 4.8-14、表 4.8-15 和图 4.8-9～图 4.8-11）

表 4.8-14 锌白铜 BZn15-20 的力学性能

性能	数据
抗拉强度 σ_b（软状态）/MPa	380～450
（硬状态，加工率 80%）/MPa	800
伸长率 δ（软状态）/%	35～45
（硬状态）/%	2～4
弹性极限 σ_e（软状态）/MPa	100
屈服强度 $\sigma_{0.2}$（软状态）/MPa	140
布氏硬度 HB（软状态）	70
（硬状态）	160～175

表 4.8-15 BZn15-20 锌白铜的低温力学性能

材料状态	温度/℃	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	断面收缩率 ψ/%
冷轧	20	517	486	21.5	54.3
	-183	655	564	35.5	62.6
退火	20	455	207	46.8	62.3
	-183	584	268	56.8	69.5

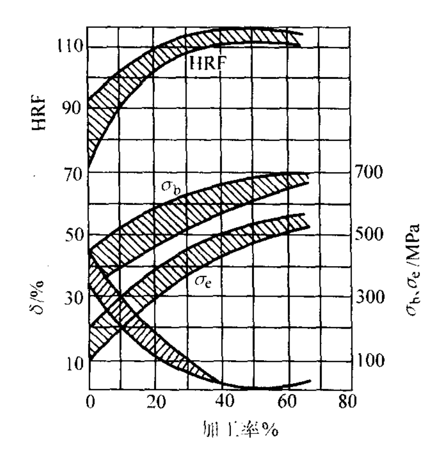


图 4.8-9 厚 1 mm 的 BZn15-20 锌白铜软板材的力学性能与加工率的关系
（实线晶粒尺寸 0.015 mm，虚线晶粒尺寸 0.10 mm）

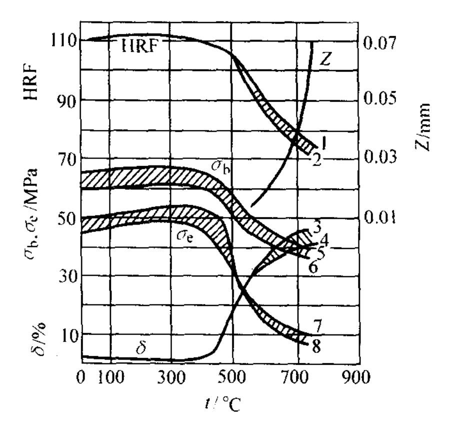


图 4.8-10 厚 1 mm 加工率 50%的 BZn15-20 锌白铜的力学性能与退火温度（保温 1 h）的关系
1—晶粒尺寸 $Z=0.015$ mm；2—$Z=0.10$ mm；
3—$Z=0.50$ mm；4—$Z=0.015$ mm；
5—$Z=0.015$ mm；6—$Z=0.10$ mm；
7—$Z=0.015$ mm；8—$Z=0.10$ mm

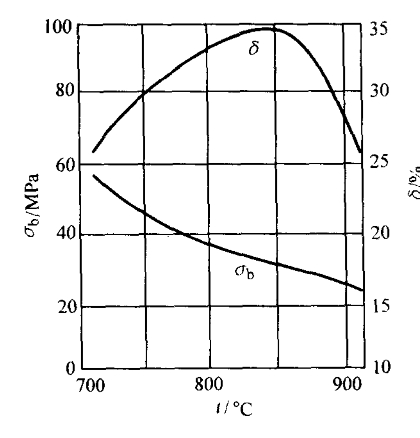


图 4.8-11 BZn15-20 锌白铜的高温力学性能

4 铁白铜

铁在 Cu-Ni 合金中的固溶度较小，950℃时可固溶4.8%，300℃时则剧降到0.1%，它提高 Cu-Ni 合金的耐蚀性与力学性能，特别能大幅度提高 Cu-Ni 合金抗海水冲击腐蚀的能力。一般 Cu-Ni-Fe 合金中的 Fe 含量不大于2%，否则合金有应力腐蚀开裂倾向，若超过4%，则腐蚀加剧。

BFe10-1-1 是铜镍基并有少量铁锰的四元合金。元素 Fe、Mn 的加入使合金力学性能和耐蚀性能显著提高。合金具有良好的综合力学性能和耐蚀性，广泛用于冷凝管、热交换器管等。

BFe30-1-1 是在 B30 合金中添加 0.5%～1.0%Fe 及 0.5～0.1Mn 构成。合金中高含量的镍显著提高合金的强度、耐蚀性、抗氧化性和耐热性。少量的铁和锰进一步提高合金的强度和耐蚀性，特别是对流动海水和湍流的抗冲刷腐蚀能力。合金具有优良的耐蚀性，较高的强度，良好的冷、热加工性能，是常用的耐蚀冷凝器管材料。

常用铁白铜的牌号见表 4.8-16。

4.1 化学成分

常用铁白铜的化学成分见表 4.8-17。

4.2 物理及化学性能

1）物理性能见表 4.8-18。

2）化学性能　合金在大气、淡水、海水和水蒸气中有很高的耐蚀性。BFe30-1-1 合金抗氧化性能良好，在碱性溶液、有机化合物以及一系列非氧化性酸溶液中也有很好的耐蚀性，但在氨水、硝酸、亚硫酸盐溶液中腐蚀速度较快。一些介质对合金的腐蚀速度见表 4.8-19。

表 4.8-16 常用铁白铜的牌号

国别	GB（中国）	ISO	ASTM（美国）	JIS（日本）	ГОСТ（俄罗斯）	DIN（德国）	BS（英国）	NF（法国）
牌号	BFe5-1.5-0.5	—	C70400	—	—	—	—	—
	BFe10-1-1	CuNi10Fe1Mn	C70600	—	МНЖМц10-1-1	CuNi10Fe1Mn	CN102	CuNi10Fe1Mn
	BFe30-1-1	CuNi30Mn1Fe	C71630	C7150	МНЖМц30-1-1	CuNi30MnFe	CN107	CuNi30Mn1Fe

表 4.8-17 常用铁白铜的化学成分（摘自 GB/T 5231—2001）

牌号	化学成分（质量分数）/%											
	Ni+Co	Fe	Mn	Zn	Pb	Si	P	S	C	Sn	Cu	杂质总和
BFe5-1.5-0.5	4.8～6.2	1.3～1.7	0.3～0.8	1.0	0.05	—	—	—	—	—	余量①	—
BFe10-1-1	9.0～11.0	1.0～1.5	0.5～1.5	0.3	0.02	0.15	0.006	0.01	0.05	0.03	余量	0.7
BFe30-1-1	29.0～32.0	0.5～1.0	0.5～1.2	0.3	0.02	0.15	0.006	0.01	0.05	0.03	余量	0.7

① Cu+所列出元素总和≥99.5%。

表 4.8-18 常用铁白铜的物理性能

合金	热学性能				密度 ρ/g·cm^{-3}	电学性能		
	熔化温度范围 θ/℃	热导率 λ/W·(m·K)$^{-1}$	比热容 c/J·(kg·K)$^{-1}$	线胀系数 $\alpha/10^{-6}K^{-1}$		电导率 g/%IACS	电阻率 $\rho/\mu\Omega\cdot m$	电阻温度系数 α_R/K^{-1}
BFe10-1-1	1 100～1 150	46.1	377	16.3	8.90	—	—	—
BFe30-1-1	1 171～1 237	29.4	376	16.2	8.94	4.6	0.42	12×10^{-4}
C70400	1 125	64	380	17.5	8.94	14	0.12	—
C70600	1 150	40	380	17.1	8.94	9.1	0.19	—

表 4.8-19 部分介质对铁白铜的腐蚀速度

合金	介质	θ/℃	腐蚀速度/mm·a^{-1}	合金	介质	θ/℃	腐蚀速度/mm·a^{-1}
BFe10-1-1	3%NaCl 溶液	40（静止）	0.010 2～0.016 4	BFe30-1-1	淡水	—	0.03
					海水	—	0.03～0.13
		40～50（流速 8～11 m/s）	0.048		水蒸气	—	0.002 5
BFe30-1-1	工业大气	—	0.002		10%硫酸水溶液	20	008
	海洋大气	—	0.001 1		10%～50%苛性钠溶液	100	0.005
	乡村大气	—	0.000 35		7%氨水	30	0.25

4.3 热加工及热处理规范

BFe10-1-1 合金热加工温度 850 ~ 950℃，合金不能热处理强化。中间退火制度：700 ~ 760℃。成品退火制度（M）：660 ~ 680℃。

BFe30-1-1 合金热加工温度为 930 ~ 1 030℃，退火温度为 650~ 820℃。美国白铜 C70400 合金热加工温度为 815 ~ 950℃，退火温度为 565 ~ 815℃；C70600 合金热加工温度为 850 ~ 950℃，退火温度为 600 ~ 825℃。

4.4 力学性能

1）技术标准规定的性能见表 4.8-20。

2）典型的力学性能见表 4.8-21 和表 4.8-22。

表 4.8-20 技术标准规定铁白铜的性能

合金	品种	状态	δ 或 $D\times S$/mm	σ_b/MPa	δ/%		技术标准
BFe10-1-1	板材	R	7 ~ 75	实测	实测		GB/T 2040—2002
		M	0.5 ~ 10.0	275	28		
		Y		373	3		
	带材	M	0.05 ~ 1.20	275	25		GB/T 2059—2000
		Y		373	3		
	管材				δ_5	δ_{10}	
		M	10 ~ 35 × 0.75 ~ 3.0	300	—	25	GB/T 8890—1998
		Y_2		345	—	8	
		M	8 ~ 159 × 1 ~ 5.0	290 ($\sigma_{0.2}$90 MPa)	30	25	LTJ 314—1992
BFe30-1-1	板材	R	7 ~ 15	343	—	15	GB/T 2040—2002
		M	0.5 ~ 10.0	373	—	23	
		Y	0.5 ~ 10.0	539	—	3	
	棒材	M	16 ~ 50	345	25	—	GB/T 4423—1992
		Y	16 ~ 50	490	—	—	
		R	40 ~ 80	345	—	25	GB/T 13808—1992
			> 80 ~ 120	—	—	—	
	线材	M	0.10 ~ 0.50	345	20（L_0 = 100 mm）		GB/T 3125—1994
			> 0.50 ~ 0.60		25		
		Y	0.10 ~ 0.50	685 ~ 980	—	—	
			> 0.50 ~ 0.60	590 ~ 880			
	管材	M	10 ~ 35	370	—	25	GB/T 8890—1998
		Y_2		490	—	6	
	带材	M	0.05 ~ 1.20	373	—	23	GB/T 2059—2000
		Y		539	—	3	

表 4.8-21 美国铁白铜典型的力学性能

合金	状态	抗拉强度 /MPa	屈服强度/MPa		标距 50 mm 的伸长率 δ/%	硬 度	
			载荷下延伸 0.5%	残余变形 0.2%		HRB	HR30T
C70400	带材						
	O61	260	83	—	41	8	—
	H01	350	—	275	21	54	57
	H02	395	—	380	11	67	65
	H04	440	—	435	5	72	68
	H06	485	—	475	3	75	69
	H08	530	—	525	2 min	76 min	70 min
	管材（外径 25 mm × 壁厚 1.65 mm）						
	OS015	285	97	—	46	58HRF	—
	H55	330	250	—	18	67HRF	—

续表 4.8-21

合金	状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa		标距 50 mm 的伸长率 δ/%	硬度	
			载荷下延伸 0.5%	残余变形 0.2%		HRB	HR30T
C70600	带材（厚度 1 mm）						
	OS050	350	90	90	35	25	72①
	OS035	358	98	98	35	27	73①
	OS025	365	110	110	35	30	75①
	H01	415	330	338	20	58	92①
	H02	468	425	435	8	75	100①
	H04	518	490	500	5	80	—
	H06	540	518	525	4	82	—
	H08	565	540	545	3	84	—
	H10	585	540	545	3	86	—
	管材（外径 25 mm × 壁厚 1.65 mm）						
	OS025	338	125	—	40	25	72①
	H55②	468	430	—	14	76	—
	线材（直径 2 mm）						
	H10	655	585	—	5	—	—

① HRF；② 在循环次数为 10^8 时，疲劳强度为 138 MPa。

表 4.8-22　BFe30-1-1 铁白铜典型的力学性能

性能	数据
抗拉强度 σ_b（软态）/MPa	380
伸长率 δ（软态）/%	23 ~ 26
（硬态）/%	4 ~ 9
比例极限 δ_p（软管）/MPa	90
弹性极限 σ_e（软态）/MPa	80
疲劳强度 σ_{-1}（软态）/MPa	180
（硬态）/MPa	220
布氏硬度 HB（软态）	60 ~ 70
（硬态）	100

3）硬度　BFe10-1-1 合金供应状态下的硬度为 84.9 ~ 88.7HBS，供应状态的室温硬度见表 4.8-23。变形率以及退火温度对 BFe30-1-1 合金硬度的影响见图 4.8-12 ~ 图 4.8-15。

表 4.8-23　BFe30-1-1 合金供应状态的室温硬度

品种	状态	HBS	HRB	品种	状态	HBS	HRB
板材	M	60 ~ 70	—	管材	M	—	45
	Y	100	85		Y	—	80

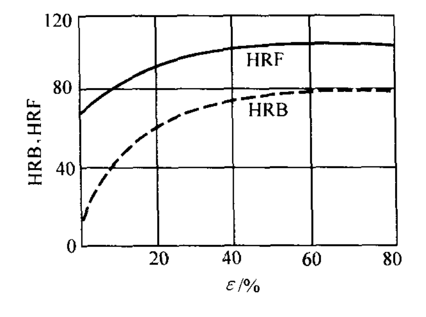


图 4.8-12　BFe30-1-1 不同冷变形量下的硬度

原材料：管材外径 60 mm，壁厚 4.8 mm

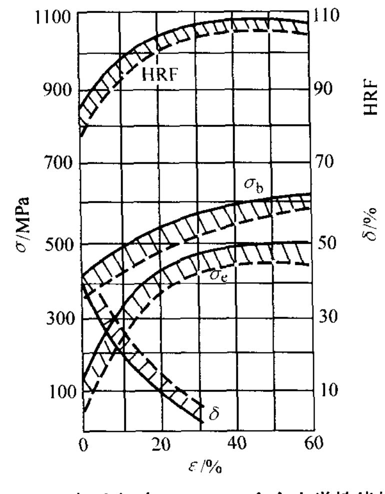


图 4.8-13　变形率对 BFe30-1-1 合金力学性能的影响

原材料：δ = 1 mm 软板

晶粒度：——0.015 mm；- - -0.07 mm

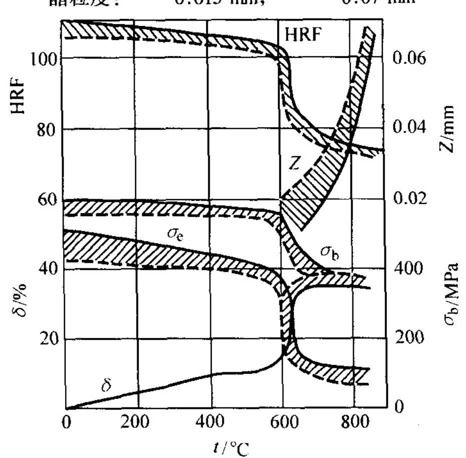


图 4.8-14　退火温度（保温 1 h）对 BFe30-1-1 合金力学性能的影响

原材料：δ = 1 mm 板、加工率 50%

晶粒度：——0.015 mm；- - -0.07 mm

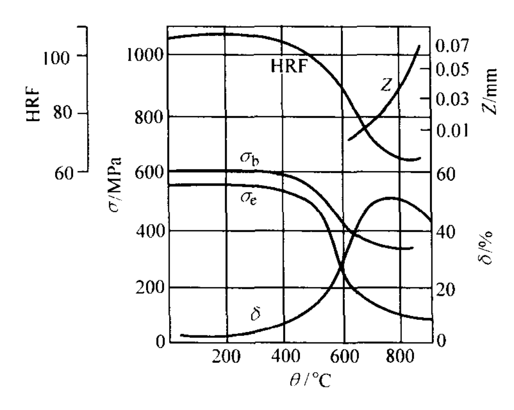


图 4.8-15　退火温度（保温 1 h）对 BFe30-1-1 合金力学性能和晶粒度的影响

原材料：加工率 70%

晶粒度：0.065 mm 的管材

4）拉伸性能　BFe10-1-1 合金供应状态下的拉伸性能为 $\sigma_b = 314$ MPa（M），$\delta = 23\%$（M）。其他的拉伸性能见表 4.8-24 和图 4.8-16 ~ 图 4.8-19。

表 4.8-24　BFe10-1-1 合金不同温度下的断面收缩率

θ/℃	室温	200	300	400	550
ψ/%	78	78	61	60	40

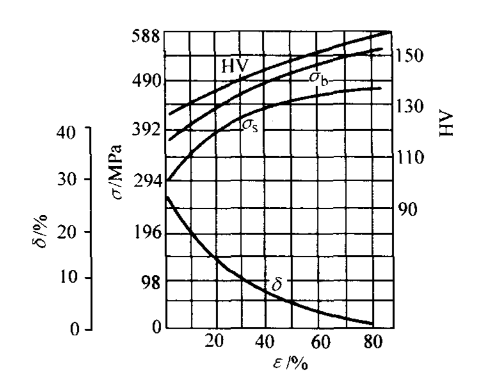


图 4.8-16　BFe10-1-1 加工率与力学性能关系

原材料：热轧后经 800℃退火 1.5 h 的条材

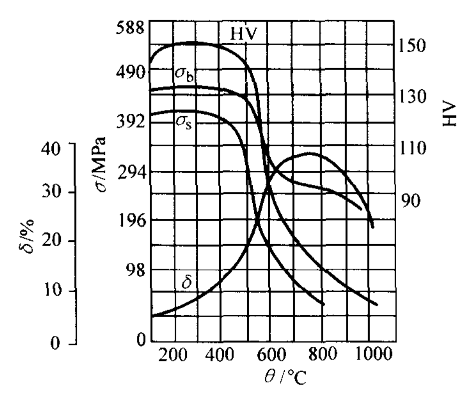


图 4.8-17　BFe10-1-1 退火温度与力学性能关系

原材料：加工率 50%的条材（退火 2 h）

BFe30-1-1 合金供应状态的室温拉伸性能见表 4.8-25。

变形率以及退火温度对材料拉伸性能的影响见图 4.8-13 和图 4.8-15。

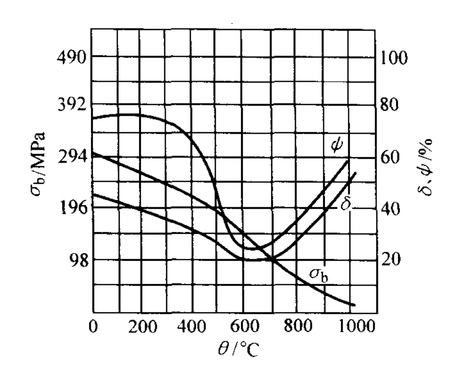


图 4.8-18　BFe10-1-1 高温拉伸性能

原材料：热轧条材

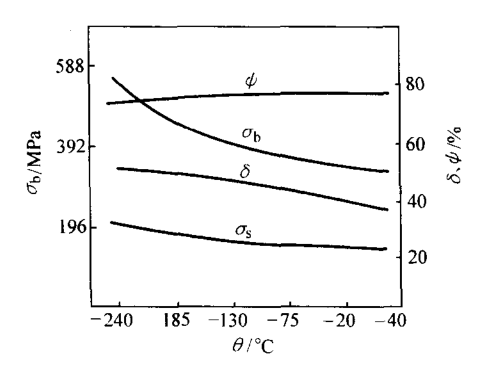


图 4.8-19　退火态 BFe10-1-1 的低温力学性能

表 4.8-25　BFe30-1-1 合金供应状态的室温拉伸性能

品种	状态	σ_b/MPa			δ/%		
		$\bar{X}$	min	max	$\bar{X}$	min	max
管材	M	455	390	550	37	23	45
	Y	570	510	635	17	8	26

高温和低温拉伸性能见表 4.8-26 和表 4.8-27。

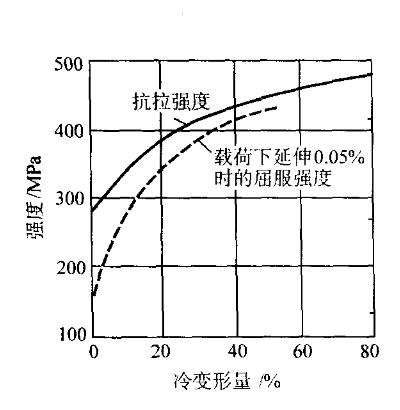
表 4.8-26　BFe30-1-1 合金高温拉伸性能

状态	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	ψ/%
M	20	365	145	41	75
	200	320	125	37	73
	300	290	120	35	65
	400	245	105	19	15
	500	175	95	16	15
	760	60	35	18	22
	871	35	15	20	26

表 4.8-27　BFe30-1-1 合金低温拉伸性能

状态	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%
M	20	380	145	54
	−18	400	150	55
	−38	450	165	56
	−93	480	170	57
	−149	550	205	61

美国铁白铜 C70600 合金力学性能与冷变形量的关系见图 4.8-20。



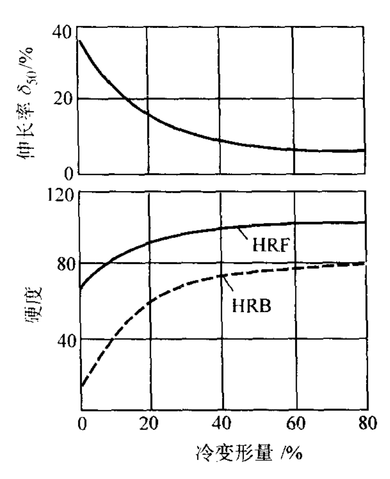


图 4.8-20 冷拔 C70600 合金（管）的力学性能与冷变形量的关系

5）持久和蠕变性能 BFe10-1-1 合金的高温持久性能和高温蠕变性能见表 4.8-28，BFe30-1-1 合金的高温持久性能见表 4.8-29，高温蠕变性能见表 4.8-30。

表 4.8-28 BFe10-1-1 合金的高温持久性能和高温蠕变性能

合金状态	试验温度	蠕变强度/MPa			持久强度
		$\sigma_{1/1000000}$	$\sigma_{1/100000}$	$\sigma_{1/10000}$	σ_{100}/MPa
退火（晶粒大小 0.25 mm）	245	82.4	116.7	—	—
	260	52.0	54.7	—	274.4
	316	—	—	—	240.1
	427	—	—	—	113.7
冷拉（加工率 21%）	245	239.1	292.0	315.6	—
	260	114.7	196.0	247.0	—

表 4.8-29 BFe30-1-1 合金高温持久性能

状态	θ/℃	σ_{100}/MPa	$\sigma_{1\,000}$/MPa
M（平均晶粒尺寸 0.04 mm）	260	340	340
	316	305	285
	371	250	205
	427	185	150
Y（消除应力后）	400	385	375
	454	275	230
	510	205	140
	566	125	70

表 4.8-30 BFe30-1-1 合金高温蠕变性能

状态	θ/℃	$\sigma_{1/1\,000}$/MPa	$\sigma_{1/10\,000}$/MPa
Y（消除应力后）	399	260	115
	454	115	40
	510	27	—

6）疲劳性能见表 4.8-31。

7）弹性性能 弹性模量 E = 140 GPa（BFe10-1-1, C70600），115 GPa（C70400），151 GPa（BFe30-1-1）；切变模量 G = 57.2 GPa（BFe30-1-1），52 GPa（C70600）。不同温度下材料的弹性模量见表 4.8-32。

4.5 工艺性能

1）熔炼与铸造工艺 BFe10-1-1 合金熔点高，流动性好，熔炼与铸造性能比较好。一般采用低频或中频感应电炉熔炼，木炭覆盖；采用半连续方式铸造，直接水冷结晶器，烟灰覆盖。铸造温度 1 300℃左右。

BFe30-1-1 合金通常采用镁砂炉衬的工频或中频感应电炉熔炼。高温下合金吸气和氧化倾向大，熔炼时熔体用熔剂或木炭保护，浇注前用镁补充脱氧。采用在烟灰覆盖下的半连续铸造工艺浇注铸锭，铸造温度为 1 300 ~ 1 350℃。

2）成形性能 合金具有良好的冷、热加工性能。

表 4.8-31 常用铁白铜高周疲劳性能

合金	合金状态	σ_b/MPa	在规定循环周次下的疲劳强度 σ_{Max}/MPa			
			10^5	10^6	10^7	10^8
BFe10-1-1	Y	369.5	261.8	—	—	144.2
	ϕ1.63 mm，冷拉 88%的线材	614	322.7	2 403	192.3	192.3
BFe30-1-1	M 管材	—	200	—	—	—
	Y_2 管材（ε = 33%）	—	—	300	245	240
	M 板材	—	—	255	185	180
	Y 板材（ε = 88%）	—	—	300	240	240

表 4.8-32 BFe10-1-1 不同温度下的弹性模量

θ/℃	室温	200	300	400	550
E/GPa	120.5	120.5	112.7	112.7	102.9

3）焊接性能 合金具有良好的焊接性能。BFe10-1-1 合金易于软钎焊、硬钎焊、气体保护弧焊和电阻对焊；也可进行保护金属弧焊、电阻点焊及缝焊和氧燃料气焊。

BFe30-1-1 合金易于进行气体保护下的金属极和钨极电弧焊、点焊、对焊、闪光焊、铜焊和锡焊，也能气焊，但不能进行埋弧焊和电渣焊。

C70600 合金软、硬钎焊，气体保护弧焊和电阻对焊优；保护金属弧焊、电阻点焊及缝焊良；氧乙炔焊中。

4）表面处理工艺　酸洗：8%～12%硝酸+15%～20%硫酸水溶液（BFe10-1-1）。

5）切削加工与磨削性能　合金切削加工性是易切削黄铜HPb63-3的20%。

4.6 选材与应用实例

BFe10-1-1合金常规的品种规格已有成熟的生产使用历史。大口径薄壁管用于导弹驱逐舰、大吨位舰船的海水管道。

BFe30-1-1合金主要用于耐蚀导管，如冷凝器、蒸馏器、蒸发器、热交换器管、救生系统管路、盐水管路、防护环及其他耐蚀构件。耐蚀性优于铝黄铜。

美国铁白铜C70400用于制造冷凝器、蒸发器和热交换器零部件、套圈、咸水管道、溴化锂吸收系统管道、舰船冷凝器入口系统；C70600用于制造冷凝器、冷凝器板、蒸馏器管、蒸发器和热交换器管、套圈、咸水管道、舰船体结构等。

合金品种规格与供应状态见表4.8-33。

表4.8-33　铁白铜品种规格与供应状态

合金	品种	板材		带材	管材		线材	棒材	
BFe10-1-1	δ或D×S/mm	0.5～10.0		0.05～1.20	10～35×0.75～3.0	8～159×1～5.0	—	—	
	状态	R，M，Y		M，Y	M，Y_2	M	—	—	
BFe30-1-1	δ或D×S/mm	0.5～10.0	7～75	0.05～1.20	10～35×0.75～3.0		0.1～6.0	16～50	25～120
	状态	M，Y	R	M，Y	M，Y_2		M，Y	M，Y	R

5 锰白铜

白铜中的锰含量一般不超过14%。在Cu-Ni-Mn合金中可形成Mn Ni化合物而有某些沉淀硬化作用，Mn提高合金的强度、耐蚀性与弹性，还能提高Cu-Ni合金抗湍流冲击腐蚀的能力，不过会略使B19合金的抗应力腐蚀开裂的能力下降，但比Al、Si、Sn、Cr、Be等元素的影响小。Mn能消除Cu-Ni合金中过量碳的不良影响，改善其工艺性能。向Cu-Ni-Zn合金添加少量Mn，也有一定的好作用。

锰白铜是一类精密电阻合金，通常以线材供应，也有少量的板、带材，目前锰白铜国内有三种牌号BMn3-12、BMn40-1.5和BMn43-0.5，它们的化学成分见表4.8-2。

3-12锰白铜又称锰铜，它按用途不同又分为精密型和分流器两种，这两种合金的分级及用途见表4.8-34。

表4.8-34　BMn3-12锰白铜的分级与用途

类型	级别	主要用途	使用温度范围
精密型	AA	用于0.01级标准电阻和0.05级以上仪器的比例臂及精度更高的仪器，作为电阻元件，其年变化率应小于0.002%	0～45℃
	A	用于0.01、0.05级标准电阻，0.2级和精度更高的电压表附加电阻及电流表分流器电阻等	
	B	用于0.5级和精度更低的附加电阻及分流器电阻等	
分流器型	A B	用于一般电子仪器，精度较低的电表的附加电阻、分流器电阻等	0～100℃

BMn40-1.5锰白铜（又称康铜）是一种比3-12锰白铜使用更早的精密电阻合金。它的优点是：具有低的电阻温度系数，而且电阻-温度曲线的直线性关系比3-12锰白铜好，可在较宽的温度范围内使用；它的耐热性比3-12锰白铜好，可以用至400℃，而3-12锰白铜的最高使用温度为300℃；耐蚀性也比3-12锰白铜好，还具有良好的加工性和钎焊性。它的缺点是对铜的热电势太高，不宜于做直流标准电阻和测量仪器中的分流器，而适用于做交流用的精密电阻、滑动电阻、启动、调节变压器及电阻应变计等。

40-1.5锰白铜箔还用于仪表、电子工业部门，供应的规格：厚度0.030～0.050 mm，宽度为40～200 mm，长度不小于5 000 mm（GB/T 5190）。

另外，40-1.5锰白铜还可以用作热电偶和热电隅补偿导线。

5.1 物理性能

1）锰白铜典型的物理性能见表4.8-35、表4.8-36。

表4.8-35　锰白铜的物理性能

性能	合金牌号	
	BMn3-12	BMn40-1.5
液相点/℃	1 011.2	—
固相点/℃	961	1 261.7
密度/$g\cdot cm^{-3}$	8.4	8.9
比热容(18℃)/$J\cdot(kg\cdot K)^{-1}$	409.5	410.3
线胀系数(100℃)/$10^{-6}K^{-1}$	16	14.4
热导率(20℃)/$W\cdot(m\cdot K)^{-1}$	21.8	20.9
电阻率(20℃)/$\mu\Omega\cdot m$	0.435	0.480
电阻温度系数α_P/K^{-1}	3×10^{-5}	2×10^{-5}(20～100℃)
和铜配对时每1℃的势电势/mV	1	电极电位0.35
直径0.03～0.54 mm线材的击穿电压/V	400	—
弹性模量/GPa	126.5	166

表4.8-36　BMn43-0.5锰白铜的物理性能

性能	数据
液相点/℃	1 291.8
固相点/℃	1 221.7
密度/$g\cdot cm^{-3}$	8.9
线胀系数（20℃）/$10^{-6}K^{-1}$	14

续表 4.8-36

性能	数据
150℃的热膨胀/mm·m^{-1}	2
500℃的热膨胀/mm·m^{-1}	8
热导率（20℃）/W·（m·K）$^{-1}$	24.4
0℃电阻率/μΩ·m	0.49～0.50（软状态）
0℃时电阻温度系数/K^{-1}	-0.000 14
25℃时与铂配对的热电热/mV	1
弹性模量/GPa	95（软状态） 120（硬状态）

2）锰白铜的热电性能见表 4.8-37～表 4.8-40。

表 4.8-37 BMn3-12 锰白铜的热电性能

温度/℃	冷端为0℃时与铂配对的热电势/mV	电阻率 ρ/μΩ·m	电阻温度系数 α/10^{-5}K^{-1}
0	0.0	0.433	—
100	+0.89	0.433	8.00
200	+1.89	0.428	6.72
300	+3.29	0.428	0.28
400	+5.06	0.428	0.00

表 4.8-38 加工率对 BMn3-12 锰白铜电学性能的影响

加工方法	加工率/%	电阻温度系数/10^{-6}K^{-1}				电阻率 ρ/μΩ·m
		200℃退火		500℃退火		
		α_{25}	β	α_{25}	β	
冷加工	16	16.3	-1.00	14.7	-0.81	0.407
	80	12.0	-0.54	20.0	-0.64	0.419
热加工	16	20.8	-1.20	15.8	-0.64	0.404
	80	13.8	-0.77	19.6	-0.81	0.419

表 4.8-39 BMn40-1.5 锰白铜的电学性能与温度的关系

温度/℃	电阻率 /μΩ·m	电阻温度系数 /10^{-5}K^{-1}	冷端为0℃时与铂配对的热电势/mV
0	0.482	—	0
100	0.482	2.06	-3.4
200	0.483	2.07	-7.2
300	0.485	4.14	-11.3
400	0.488	7.02	-15.5
500	0.497	11.25	-19.9
600	0.503	18.20	-24.5
700	0.509	12.90	-29.1
800	0.515	13.75	-33.7

表 4.7-40 BMn43-0.5 锰白铜的电学性能与温度的关系

温度/℃	电阻率/μΩ·m	电阻温度系数/K^{-1}
0	0.504	-0.000 14
100	0.497	-0.001 2
200	0.491	-0.000 10
300	0.486	-0.000 06
400	0.483	0.000 00
500	0.483	+0.000 04
600	0.485	+0.000 06
700	0.488	+0.000 08
800	0.492	

5.2 化学性能

锰白铜 BMn43-0.5 在下列介质中的质量损失：10% H_2SO_4，1 g/（m^2·d）；2% NaOH，0.05g/（m^2·d）；海水，0.25g/（m^2·d）。

5.3 力学性能

1）相关标准规定的性能见表 4.8-41、表 4.8-42。

表 4.8-41 锰白铜板材的力学性能（GB/T 2052）

合金牌号	状态	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%
		≥	
BMn4-1.5	硬	590	实测
BMn3-12	软	355	25

表 4.8-42 锰白铜板材的弯曲性能

合金牌号	材料状态	厚度/mm	弯曲角度	要求	备注
BMn4-1.5	软	≥1.0	180°	无裂纹和分层	弯心半径等于板厚
	硬		90°		

2）锰白铜典型的力学性能见表 4.8-43～表 4.8-46。

表 4.8-43 BMn3-12 锰白铜的力学性能

性能	数据
抗拉强度 σ_b（硬状态，加工率 60%）/MPa	900
（软状态）/MPa	400～550
伸长率 δ（软状态）/%	30
（硬状态）/%	2
屈服强度 $\sigma_{0.2}$（铸造状态）/MPa	140
（软状态）/MPa	200
布氏硬度 HB（软状态）	120

表 4.8-44 BMn4-1.5 锰白铜的力学性能

性能	数据
抗拉强度 σ_b（硬状态，加工率 80%）/MPa	700～850
（软状态）/MPa	400～500
伸长率 δ（软状态）/%	30
（硬状态，加工率 80%）/%	2～4
面缩率 ψ（铸造状态）/%	26
（软状态）/%	71
比例极限 σ_p（软状态）/MPa	87
疲劳强度 σ_{-1}（热轧棒材）/MPa	243
冲击吸收功/J（铸造状态）	87
布氏硬度 HB（铸造状态）	68
（软状态）	75～90
（硬状态）	155
电阻元件最高工作温度/℃	400
热电偶最高工作温度/℃	900

表 4.8-45　BMn43-0.5 锰白铜的力学性能

性能	数据
抗拉强度 σ_b（硬状态，加工率 80%）/MPa	700
（软状态）/MPa	400
伸长率 δ（硬状态，加工率 80%）/%	2
（软状态）/%	30
面缩率 ψ（软状态）/%	72
弹性极限 σ_e（硬状态，加工率 50%）/MPa	100
8×10^6 次循环时的疲劳强度 σ_N（软状态）/MPa	190
屈服强度 $\sigma_{0.2}$（铸造状态）/MPa	220
布氏硬度 HB（软状态）	85～90
（硬状态，加工率 80%）	185

表 4.8-46　BMn43-0.5 锰白铜的低温力学性能

材料状态	温度/℃	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	面缩率 ψ/%
退火	20	422	138	40	77
	-10	463	129	47	78
	-40	474	147	43	78
	-80	506	155	48	75
	-120	540	169	48	74
	-180	628	185	57	76

5.4　工艺性能（表 4.8-47）

表 4.8-47　BMn3-12 锰白铜线材的适宜退火温度

线材直径/mm	1	0.5	0.1
适宜的退火温度/℃	750	700	550

编写：周　逵（长沙铜铝材有限公司）
曹玲飞（中南大学）

第9章　艺术铜合金和形状记忆合金

1　艺术铜合金

我国是最早使用艺术铜合金的国家，早在殷商时代就大规模地使用锡青铜制作各种各样装饰性很强、艺术价值极高的器皿、雕塑。用铜合金制作艺术品具有古朴庄重或华丽典雅的特点，历来深受各国人民的青睐。随着合金设计、熔铸加工、仿古作旧、表面处理等相关技术的进步，艺术铜合金门类有了很大的发展。

艺术铜合金是指那些用于制造鼎、镜、鼓、香炉、佛像、雕塑等艺术品、装饰品和乐器、兵器或钱币等的铜合金。与普通铜合金不同的是它们对色泽、耐蚀性、磨削加工性或音质、响度有特殊要求。和其他铜合金一样，艺术铜合金按照工艺方法可以分为铸造合金和变形合金两大类。而按照合金成分则可以分为紫铜、黄铜、青铜和白铜。

紫铜具有古铜色，朴实、大方、庄严，韧性好，焊接性能优良，多用作雕塑、人物雕像。黄铜有华贵艳丽的金黄色，常用作饰品，富丽堂皇、高贵典雅。青铜具有青靛色，耐蚀性好，用作器皿，稳重耐久。而白铜则具有银白色光泽，多用作餐具、乐器、纪念品，显得高洁清新。

1.1　紫铜

艺术用紫铜主要有二号铜（T2）、三号铜（T3）和磷脱氧铜（TP2）三种。它们的成分、物理化学性能、工艺性能见第2章。常用作铸造小型雕像、景泰蓝和镶嵌装饰品的胎坯、钱币和器皿。紫铜板可作铜板画、大型浮雕等。

1.2　黄铜

艺术黄铜色如黄金，常作金箔和金粉的替代品，得到广泛使用。变形普通黄铜以薄板、箔、管、线的形态用于艺术品，它们的成分、性能见第4章。艺术用铸造黄铜的牌号和化学成分列于表4.9-1。含锌（Zn）20%的黄铜经过研磨会显现出美丽的晶粒，在艺术品加工中称此工艺为“点金”。

表4.9-1　铸造艺术黄铜的牌号和化学成分（质量分数）　%

合金	Cu	Zn	Sn	Al	Pb	Mn	色泽
ZCuZn6Al0.5P	余量	4~8	—	0.4~0.7	0.1~0.3（P）	—	金黄
ZCuZn12	87~89	余量	—	—	—	—	
ZCuZn12Al	87~89	余量	—	1.0~2.0	—	—	
ZCuZn24Sn1Pb3	70~74	余量	0.5~1.5	—	1.5~3.5	—	
ZCuZn27Mn3Pb2Sn	余量	25~30	0.3~0.5	—	2.0~3.0	25~4.0	
ZCuZn30	68.5~71.5	余量	—	—	—	—	
ZCuZn33Mn2Pb	余量	32~34	0.3~0.5	—	0.5~1.0	1.5~2.7	
ZCuZn35Sn1Al	64~66	余量	0.5~1.5	0.2~0.4	—	—	
ZCuZn38Sn1Pb1Al	58~64	余量	0.5~1.5	0.5~1.0	0.8~1.5	—	
ZCuZn38Al1Mn	57~62	余量	—	0.25~0.5	—	0.1~1.0	银
ZCuZn20Mn20Sn1Al	55~61	17~23	0.5~2.5	0.25~3.0	—	0.1~2.0	

1.3　青铜

青铜种类很多，除做高强导电材料（第5章）、弹性导电材料（第5章）、高强耐热材料（第6章）、高强耐磨材料外，还大量用于艺术造型中。

(1) 锡青铜

艺术锡青铜中最主要的是铸造锡青铜，牌号和化学成分见表4.9-2。艺术青铜的锡含量一般小于20%，其组织为α＋（α＋δ）相。α相是锡在铜中的固溶体，面心立方晶格。δ相为复杂六方晶格的$Cu_{31}Sn_8$金属间化合物，其共析分解十分缓慢，硬而脆，故能提高强度和耐磨性。砂型铸造时如果Sn含量为7%、金属型铸造时如果Sn含量为5%，就会出现δ相。锡含量过多则导致着色困难。而含5%Sn以下时为单一α相，易于着色。锡青铜因其结晶温度范围宽，易产生疏松和补缩困难。锡青铜耐蚀性优良，表面生成SnO_2薄膜，能起很好的保护作用。同时，α和δ相的电位相近，微电池作用很微弱。合金元素对锡青铜的影响见表4.9-3。

1) 像用锡青铜　Sn含量一般不超过10%。古代著名铜像（佛）的化学成分见表4.9-4。

表4.9-2　艺术锡青铜的化学成分（质量分数）　%

合金	Sn	Al	Zn	Pb	Mn	Cu
ZCuSn2Zn3	1.8~2.2	—	2.5~3.5	—	—	余量
ZCuSn3Al2	2.5~3.5	1.5~3.5	—	—	—	余量
ZCuSn12Mn1	10~15	—	0.15~0.25	0.2~0.3	1.0~1.25	余量
ZCuSn18	17~19	—	—	—	1.0~2.0	余量

表 4.9-3 合金元素对锡青铜的影响

元素	作用
Zn	溶于α固溶体，缩小凝固温度范围，提高流动性，能还原 SnO_2，净化合金。含量超过5%后难于生成温雅的绿膜，容易风化，有时还会使铸文、图案细部模糊不清
Al	溶于α固溶体，其氧化物会使熔体的流动性降低。含量达到0.5%时就会使材料由暗红色变为金黄色
Pb	不溶于合金中，以质点分布，可改善合金的耐磨性和切削性能，提高合金的耐水性。Pb的衰减能力很大，因此，响铜不得加入Pb。含量过高时会形成重力偏析
P	磷在锡青铜中的溶解度很小，磷过量会析出硬而脆的 Cu_3P，常与α、δ相形成二元或三元共晶。P降低青铜的着色性能，但有显著的脱氧作用
Fe	常以游离态分布在合金中，有利于着色
As	在锡青铜煮沸着色时效果明显，但含量以不超过0.45%为宜
Si	合金中有Si会由暗红转为茶色或紫葡萄色

表 4.9-4 古代著名铜像（佛）的化学成分（质量分数） %

名称	Cu	Sn	Fe	Ni	Zn	Pb
希腊古铜像	84~88	9.0~14.3	0.4~1.2	0.34	—	—
罗马古铜像	72~80	7.3~9.0	0.3~1.2	0.35	—	10~19
日本奈良大佛	91~95	1.46~2.46	0.95~1.43	0.28	—	—
中国天坛大佛	86~89.2	7.5~9.0	—	—	3~8	—

2）钟用锡青铜 Sn含量一般在13%~25%之间，含量偏低时（5.5%~12.5%），基音强度弱，其他分音的强度也弱，而第二分音特别强，音色单调、尖锐刺耳。含量过高（超过25%）时冲击韧性太差，不堪撞击。通常钟用锡青铜不宜加Pb，因为Pb的衰减能力大、抑振。但是，我国铜钟中往往加有0.6%~1.95%的Pb，并发现当Sn在13%~14%时，少量的Pb对基频影响很小，而且会适当改善音色。我国古铜钟的化学成分见表4.9-5。

表 4.9-5 我国古代铜钟的化学成分（质量分数） %

钟名及文献	Cu	Sn	Pb	其他
《考工记》钟鼎之齐	83.4	16.6	—	—
永乐大钟	80.54	16.4	1.12	—
《天工开物》钟条	93	8.5	—	Au、Ag少量
《明实录》朝钟制度	81.2	5.4	—	Fe: 13.4% Au、Ag少量 d

3）镜用锡青铜 镜用锡青铜的Sn含量很高，有的高达30%，基本上是单一的δ相，非常脆。高锡青铜有很高的硬度，研磨后可获得极光滑的表面。我国古代铜镜的化学成分见表4.9-6。

4）鼓用锡青铜 鼓用锡青铜和其他青铜器一样，是Cu、Sn、Pb三元合金，我国古代典型铜鼓的化学成分见表4.9-7。

5）币用锡青铜 币用锡青铜也是Cu、Sn、Pb三元合金，但成分不稳定。明、清以后多用紫铜和黄铜。我国古币的化学成分见表4.9-8。

表 4.9-6 我国古代铜镜的化学成分（质量分数） %

年代	Cu	Sn	Pb	Fe	其他
战国以前	66~71	19~21	2~3	—	—
	66.33	21.99	3.36	—	—
	71.44	19.62	2.69	—	—
	74	25	1	—	—
汉魏时代	73	22	5	—	—
	70	23.25	5.18	—	1.0
	68.82	24.65	5.25	—	—
	69.24	22.94	6.48	—	—
	67.82	22.35	6.09	—	4.15
	70.50	26.97	1.65	—	0.88
	72.64	24.16	2.06	—	1.14
隋唐时代	69.55	22.48	5.86	—	—
	68.95	23.65	6.08	—	—
	70	25	5	—	—
宋代以后	69	12	14	5	—
	69	8	15	6	—

表 4.9-7 我国古代铜鼓的化学成分（质量分数） %

出土地点	Cu	Sn	Pb
石家坝	87.95~95.63	4.64~6.97	—
石寨山	77.45~85.43	—	0.37~4.00
冷水冲	62.43~74.03	6.88~14.96	14.50~27.41
遵义	66.90~84.06	6.33~7.10	7.30~19.50
北流	61.78~70.45	6.16~14.24	9.94~23.0
灵山	60.12~70.56	8.84~12.80	7.60~19.76
麻江	63.85~82.73	9.22~13.16	0.73~6.90
西盟	70.12	2.22	23.36
容县	82.05	7.36	5.8

表 4.9-8 我国古币的化学成分（质量分数）%

年代	名称	Cu	Sn	Pb	Zn	Fe
战国	布币	70.42	9.92	19.30	—	—
	齐刀	55.10	4.29	38.60	—	1.00
	明刀	45.05	5.90	45.82	—	2.00
新莽	大泉五十	86.72	3.41	4.33	4.11	0.13
	货泉	77.53	4.55	11.99	2.03	1.46
	小泉直一	89.27	6.39	0.37	2.15	1.50
	大布黄千	89.55	4.71	0.62	1.48	3.56
	货布	83.41	6.86	6.54	0.84	0.47
	契刀五百	81.13	6.96	6.17	1.01	1.39
西汉	吕后八铢	61.23	9.83	25.49	1.55	1.54
	文帝四铢	92.66	0.27	0.43	2.82	0.28
	文帝四铢	70.77	8.19	12.50	2.66	2.80
	文帝四铢	93.97	0.16	0.57	3.85	0.05

(2) 铝青铜

铝青铜与锡青铜相比有更多的优点：材料表面有一层可以自愈的 Al_2O_3 保护膜，在大气和海洋环境中有很高的耐蚀性能。强度高、抗冲击，而且价格便宜。常温下铝在铜中的极限溶解度为 9.4%。合金中 Al 含量超过固溶极限后会出现 γ 相，它硬而脆，且会在 565℃以下温度发生缓冷脆裂，导致铸件裂纹。而加入 Mn、Fe、Pb、Ni 可以抑制这种现象。铸造铝青铜的化学成分见表 4.9-9。

表 4.9-9 铸造铝青铜的化学成分（质量分数）%

合金	Al	Fe	Mn	Cu
ZCuAl9Mn2	8.0~10.0	—	1.5~2.5	余量
ZCuAl9Fe3	8.0~10.0	2.0~4.0	—	余量
ZCuAl10Mn2Fe3	9.0~11.0	2.0~4.0	1.0~2.0	余量

(3) 现代仿金材料

近年来，仿金材料（亦称亚金合金）有重要发展。主要是在铝青铜中添加少量锌、镍、锡和稀有元素，充分利用铝青铜的耐蚀、抗冲击性，进一步改进铝青铜的色泽和加工性能，降低成本。其中“18 合金”和造币材料 QAl5-5-1 颇为著名。“18 合金”添加有铟（In），色泽酷似 18K 黄金，并有极高的耐蚀性、优良的冷热加工性能和焊接性能，成为巨型佛像、城市纪念性雕塑的首选材料。“18 合金”的成分和性能见表 4.9-10 和表 4.9-11。铝青铜 QAl5-5-1 具有良好的加工性能和耐蚀、耐磨性能，色泽金黄，被选作冲制“欧元”硬币的材料，其主要成分见表 4.9-10。

表 4.9-10 新型仿金材料的主要成分（质量分数）%

合金	Cu	Al	Sn	Zn	Ni	In
18 合金	余量	3.0~5.0	—	—	1.5~2.5	0.2~1.0
QAl5-5-1	余量	4.0~6.0	0.5~1.5	4.0~6.0	—	—

表 4.9-11 18 合金的性能

项目	数值
密度/$g \cdot cm^{-3}$	8.13
固相线温度/℃	1 046
液相线温度/℃	1 065
比热容/$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	380
线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$	18.5
抗拉强度/MPa	230~300
伸长率/%	24~50
硬度 BRS	73
3.5% NaCl25℃全浸的腐蚀速率 /$g \cdot (cm^2 \cdot a)^{-1}$	7.26(锡青铜为 9.32)

1.4 白铜

白铜（参见第 8 章）是 Cu-Ni 系合金，一般含 5%~30%Ni，色泽为银白色，光泽艳丽。含 20%左右的白铜常用来制造钱币和奖杯、奖牌，是白银的理想替代品。这些合金硬度较高，刻印时磨耗少，易于加工。加锌白铜最接近银色，具有很好的加工性能和耐蚀性，是制造餐具、乐器和装饰品的理想材料。常用艺术白铜的成分见表 4.9-12。

表 4.9-12 铸造艺术白铜的化学成分（质量分数）%

合金	Cu	Ni	Zn	Sn	Pb	Fe	Mn	Si
ZCuNi12Zn20Pb10	余量	11~14	17~25	1.5~3.0	8~11	1.5	0.5	0.5
ZCuNi16Zn16Sn3Pb5	58~61	15.5~17	余量	2.5~3.5	4.5~5.5	1.5	0.5	—
ZCuNi20Zn5Sn4Pb4	余量	9~21.5	3~9	3.5~4.5	3.0~5.0	1.5	1.5	0.15
ZCuNi25Zn2Sn5Pb2	余量	24~27	1~4	4.5~5.5	1.0~2.5	1.5	1.5	0.15

2 形状记忆合金简介

(1) 形状记忆合金的概念

给已适当变形的材料以温度变化，它能自动做功而回复变形前形状的效应称“形状记忆效应”（Shape Memory Effect），具有形状记忆效应的合金称为形状记忆合金（Shape Memory Alloy）。

早在 40 年代人们就对形状记忆效应进行了研究，但直至 60 年代，美国海军武器研究所首次将形状记忆合金应用于飞机油压管接头后才引起人们广泛关注。此后，经过近 40 多年的研究与开发，形状记忆合金才开始走向实用化阶段，广泛应用于航空、航天、能源、汽车工业、电子、医疗、机械、建筑、服装、玩具等各个领域。当前，形状记忆合金无论在材料的研究上，还是在制备工艺及元件的应用上都在不断的开拓和发展。其中，铜基形状记忆合金是目前发现的形状记忆合金中的一个主要类别，它具有形状记忆、超弹性、高阻尼和良好的导电性四大功能，且生产工艺简单、成本低廉和性能优良。其记忆性能仅次于 Ni-Ti 系合金，相变点可在 -100~300℃范围内调节，在要求反复使用次数不太高、条件不太苛刻情况下，应用前景非常广泛。

(2) 形状记忆效应与伪弹性

形状记忆效应有三种形式。

第一种称为单向形状记忆效应，即将母相冷却或加应力，使之发生马氏体相变，然后使马氏体发生变形，改变其形状，再重新加热到 A_s 以上，马氏体发生逆转变，温度升至 A_f 点，马氏体完全消失，材料完全恢复母相形状。一般没有特殊说明，形状记忆效应都是指这种单向形状记忆效应，见图 4.9-1（a）。

有些形状记忆合金在加热发生马氏体逆转变时，对母相有记忆效应；当从母相再次冷却为马氏体时，自觉回复原马氏体的形状，这种现象称为双向形状记忆效应，又称可逆形状记忆效应。如图 4.9-1（b）。

第三种情况是在 Ti－Ni 合金系中发现的，在冷热循环过程中，形状回复到与母相完全相反的形状，称为全方位形状记忆效应。见图 4.9-1（c）。

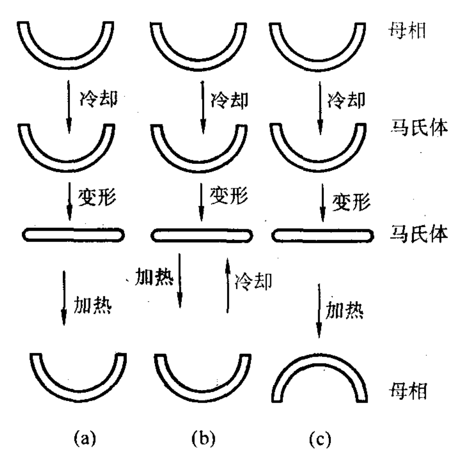


图 4.9-1　形状记忆效应的三种形状

冷却时，在无应力条件下马氏体在 M_s 开始形成。若施加应力，马氏体可以在 M_s 以上温度形成，这种马氏体称为应力诱发马氏体（Stress－Induced Martensite，简称 SIM）。它的相变驱动力不是热能而是机械能。当材料处于 $M_s \sim M_d$ 温度范围时发生变形，就会产生伪弹性，类似橡胶。M_d 是应力诱发马氏体相变的终了温度。在 $M_s \sim M_d$ 间外加应力，可以保持马氏体稳定，但应力一旦消除，马氏体就变得不稳定。图 4.9-2 表示超弹性的应力－应变曲线。曲线上部平台对应于应力作用下形成的马氏体，而曲线下部平台对应于应力消除时的马氏体可逆转变。它们的可恢复应变量达到 10%以上。伪弹性也可称之为机械形状记忆效应。

伪弹性有三个应用特点：①其可恢复应变量能达到 10%以上，几乎高出通常材料弹性应变二个数量级；②合金显示恒弹性，在应力恒定时会产生较大的应变；③在未发生应力诱发相变前，合金就具有 2%的弹性应变，这样做成的弹簧也比一般弹簧性能好得多。

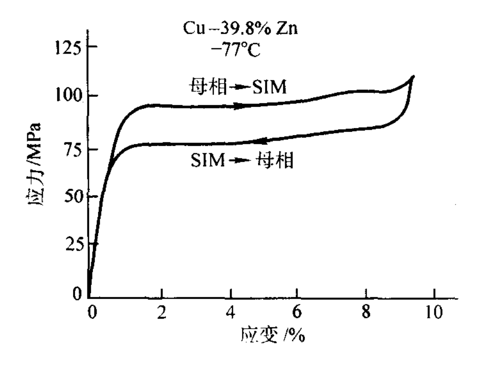


图 4.9-2　CuZn 合金应力诱发马氏体相变呈现的伪弹性行为

2.1　铜基形状记忆合金种类

现已发现具有形状记忆效应的铜基形状记忆合金体系有：Cu-Zn，Cu-Zn-Al，Cu-Zn-Sn，Cu-Zn-Ni，Cu-Zn-Si，Cu-Zn-Ga，Cu-Al，Cu-Al-Ni，Cu-Al-Mn，Cu-Al-Si，Cu-Al-Nb，Cu-Al-Be 等。

2.2　部分铜基形状记忆合金的性能（见表 4.9-13）

表 4.9-13　Cu-Zn-Al 和 Cu-Al-Ni 记忆合金相关性能数据

项　目	单　位	Cu-Zn-Al	Cu-Al-Ni
熔点	℃	950～1 020	1 000～1 050
密度	g/cm^3	7.8～8.0	7.1～7.2
电阻率	$\mu\Omega \cdot m$	0.07～0.12	0.1～0.14
导热率	$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	120(20℃)	75
热胀系数	$10^{-6}\ K^{-1}$	—	—
		16～18(马氏体)	16～18(马氏体)
比热容	$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	390	400～480
热电势	$10^{-6}\ V \cdot K^{-1}$	—	—
相变热	$J \cdot kg^{-1}$	7 000～9 000	7 000～9 000
E－模数	GPa	70～100	80～100
屈服强度	MPa	150～300	150～300
抗拉强度(马氏体)	MPa	700～800	1 000～1 200
伸长率(马氏体)	%	10～15	8～10
疲劳极限	MPa	270	350
晶粒大小	μm	50～100	25～60
转变温度	℃	－200～＋170	－200～＋170
滞后大小($A_s - A_f$)	℃	10～20	20～20
最大单向形状记忆	应变	5%	6%
最大双向形状记忆	应变		
$N = 10^2$		1%	1.2%
$N = 10^5$		0.8%	0. 8%
$N = 10^7$		0.5%	0. 5%
上限加热温度(1 h)	℃	160～200	300
阻尼比	SDC－%	30	10
最大伪弹性应变(单晶)	%应变	10	10
最大伪弹性应变(多晶)	%应变	2	2
回复应力	MPa	200	—

2.3　铜基形状记忆合金的工艺性能

1）熔炼与铸造工艺　合金通常采用中频感应电炉熔炼。对 Cu-Al-Ni、Cu-Al、Cu-Al-Si 系合金可采用真空熔炼或气体保护熔炼，对 Cu-Zn、Cu-Zn-Al、Cu-Zn-Sn、CuAlMn 等含 Zn 、Mn 元素的合金不能采用真空熔炼，在 N_2 或 Ar 保护性气氛下进行熔炼。上述合金在大气中熔炼时可采用煅炼木炭做覆盖，造渣剂采用 Na_3AlF_6 与 CaF_2，浇注温度 1 280～1 360℃。

2）成形性能　合金热加工性能良好，可进行挤压、热轧、锻造等加工，热加工温度为 800～860℃。合金冷加工性能较差，可在双相区淬火后进行冷加工，冷加工后，合金需进行固溶处理，固溶温度 800～850℃，介质淬火或空冷。

2.4　铜基形状记忆合金的应用

1）自适应紧固件、连接件和密封垫　自动紧固件，即热收缩的管接头，使用方法是把制作好的记忆合金管接头（一般内径比被连接的管子外径小4%左右）放在低温（$T<M_s$）下扩大管径，然后套在要被连接的管子头上。当管接头渐渐升温超过 A_s 温度时，它将收缩到原来的形状，从而将被连接的管子牢固地连接起来（图4.9-3）。如果这类管子在 M_s 温度以上工作的话，它们的结合是极为牢固的。

例如，用Cu-18.4Al-8.7Mn-3.4Zn-0.1Zr（质量分数）记忆合金管接头，进行管道连接，该管接头技术性能指标可达：

相变滞后宽度　>90℃；
贮存温度　<50℃；
记忆应变　>3.5%；
拉脱力　>3 500 N（ϕ8 mm管）；
气密性　在振动及50 MPa静压下，5 min压力不降，无泄漏。

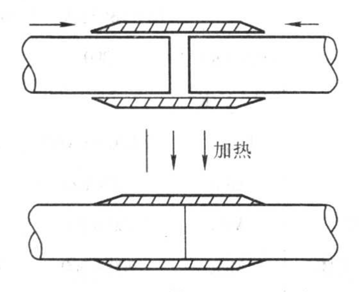


图4.9-3　记忆管接头工作示意图

2）热敏控制器　SMAs是一种热敏材料。它可以按环境条件选取适当的合金，控制其 M_s、A_f 及变温范围，借助SMAs的形状记忆达到控温目的。很显然，它与常见的光电、压电、热电等感知器的原理不同，后者是在感知信号后输出电信号（或其他信号），仅具有"感知"职能。SMAs不仅可作为感知器，更重要的是可兼负驱动作用。

图4.9-4所示为电加热水壶的手柄控制器，柄内装有一只SMAs制作的弹簧。水开后，蒸汽吹至SMAs元件上发生马氏体向奥氏体相变，弹簧伸长带动按钮推开电触头，达到自动切断电源目的。同双金属片比较，SMAs元件机构简单，双金属片挠曲量相对SMAs要小得多。一块长50 mm、厚1 mm的双金属片在100℃温差产生的挠度仅2～4 mm，而在相同条件下SMAs却可得到20 mm挠度，因而用后者更为灵敏可靠。

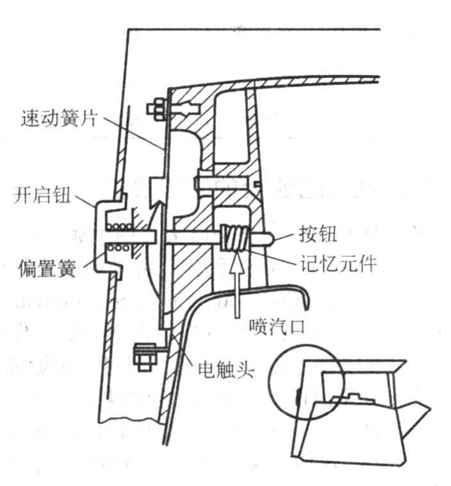


图4.9-4　铜基SMAs制作的电加热水壶控制器

3）自动调节装制　图4.9-5所示为美国和日本生产的育苗室、温室等天窗自动控制器，其中用Cu基SMAs制作的弹簧充当温度传感器和动力机构。在预定的温度，通过SMAs弹簧的伸缩来开启和关闭窗户。铜基形状记忆合金已巧妙地应用于汽车的汽化器上。由CuZnAl合金制成一个简单的喷油嘴，插入Stromberg型汽化器中，喷嘴的尺寸可以根据燃料的温度高低而改变大小，从而正确控制燃料的流量来补偿燃料黏度的变化所造成的损耗。图4.9-6示出这种喷嘴的设计及测得的一些参量曲线。值得注意的是，在燃料温度较高时，这种喷嘴排出的CO气体减少，这样可防止对环境的污染。类似的还有热机冷却风扇启闭器、散热器阀门、空调风向调节器、电冰箱自动开关、化学反应温度自动控制器、干燥装置开关、对流电子炉灶中气流调节器等。

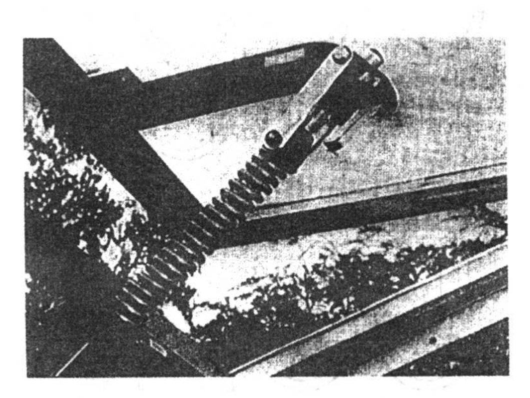


图4.9-5　铜基形状记忆合金弹簧制作的天窗自动控制器

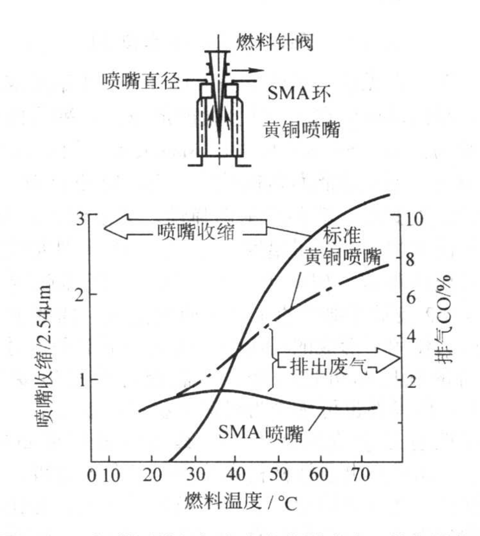


图4.9-6　铜基形状记忆合金汽化器喷油及其参量曲线

4）色调记忆配件　含12%～15% Al和1%～5% Ni（质量分数）的铜合金是具有热弹性马氏体相变的色调记忆元件，在200～400℃范围内具有相变特性温度。通过相变，合金的色调从红色变为金黄色。随着合金中Al量的改变，相变特性温度最低可降到-200℃。因此，通过加入适当Al量和外加负荷，相变特性温度可在-200～400℃间任意调整。这样就可以用色调记忆特性开发温度指示器和在交变应力作用下的指示器。

5）弹性减振复合材料　继电器是控制电路中的重要元件，广泛应用于国防及民用工业中。电子器材专家认为真正理想的继电器弹簧片材料应具有以下四个基本特点：

① 优良的导电能力；
② 高弹性；

③ 优良的阻尼性能，即高减振性；

④ 良好的耐热能力。

铍青铜是一种高导电、高弹性的材料，而铜基记忆合金在马氏体状态及相变过程中具有优良的减振能力，选用铍青铜作为导电、弹性组元与高减振的铜基形状记忆合金进行爆炸复合，可制成一种新型弹性减振复合材料。

材料减振性能的主要衡量指标就是材料的内耗值。对利用 CuAlNiMnTi（M_s = 150℃）与 QBe2 爆炸复合的材料的内耗值进行测试，结果见图 4.9-7 和图 4.9-8。

图 4.9-7 所示为复合板材、QBe2 常温下内耗与应变振幅的关系。复合板材的内耗值较之 QBe2 增加了近一个数量级，而且具明显的振幅效应。

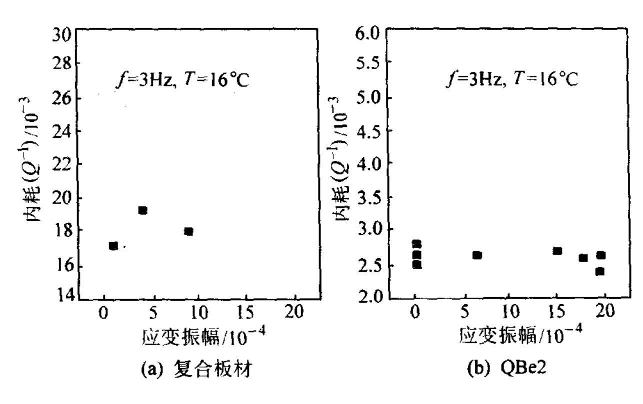


图 4.9-7 常温下复合板材、QBe2 内耗与应变振幅的关系

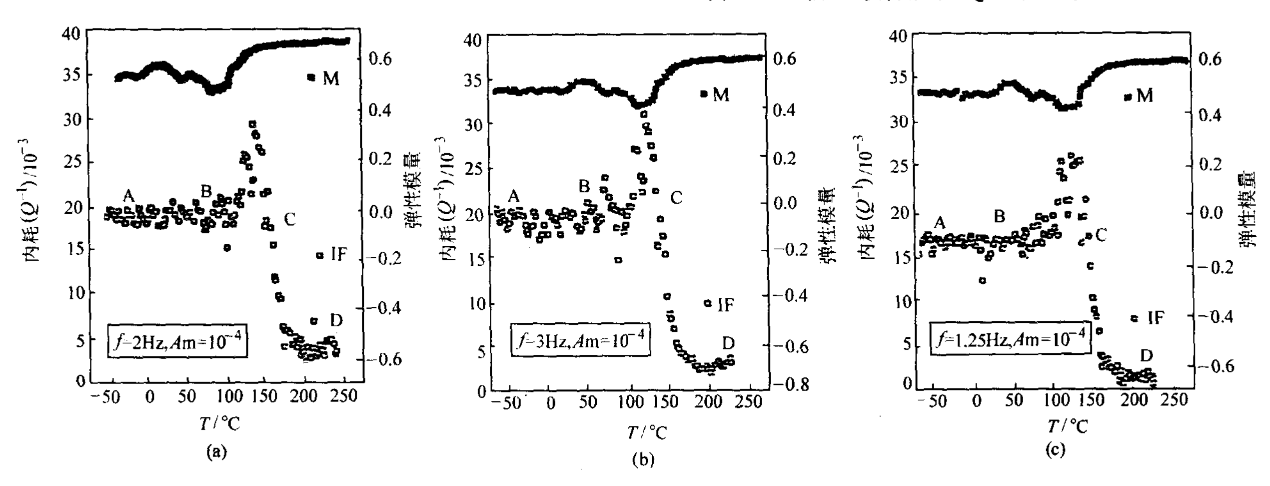


图 4.9-8 复合板材在不同频率下内耗随温度变化

图 4.9-8 所示为复合板材在不同的振动频率下内耗随温度的变化关系。复合板材在 M_s 点附近及以下很宽的温度范围内均显示出优异的减振性，特别是在相变温度附近，内耗值达最大。振动频率在实验范围内对复合板材的内耗特性影响不大。

编写：娄花芬（洛阳铜加工集团有限责任公司）
李 周（中南大学）

第10章　加工铜及铜合金牌号、标准对比

目前，国际上最具代表性且比较常用的标准有：中国国家标准（GB）、国际标准化组织标准（ISO）、德国工业标准（DIN）、美国材料与试验协会标准（ASTM）、日本工业标准（JIS）、英国标准（BS）、法国标准（NF）、俄罗斯标准（ГОСТ）。

1　加工铜及铜合金牌号的表示方法

1.1　中国

中国国家标准（GB/T 340—1976）规定，加工铜及铜合金的牌号命名以“铜的种类代号、化学符号后的元素含量或顺序号”表示，其中，铜的种类代号取第一个汉字汉语拼音的第一个大写字母，“T”代表纯铜，“H”代表黄铜，“Q”代表青铜，“B”代表白铜。

加工铜及铜合金牌号的组成如表4.10-1所示。

1.2　国际标准化组织

国际标准化组织标准（ISO 1190/1—1982）规定，铜及铜合金的牌号用材料的化学成分表示。所有牌号前均应有“ISO”前缀，但是在国际标准或通讯文件中已明确是用ISO牌号时，为简便起见可以省略“ISO”。基体元素和主要合金化元素应采用国际化学元素符号，其后加上表示金属特征的字母或表示合金名义成分的数字。

加工铜及铜合金牌号的组成如表4.10-2所示。

表4.10-1　加工铜及铜合金牌号的组成

分类	牌号组成	示例
纯铜	T+顺序号①	例如：T1、T3
纯铜（添加其他元素）	T+添加元素化学符号+顺序号①或添加元素含量②	例如：TP2、TAg0.1
无氧铜	TU+顺序号①	例如：TU1、TU2
普通黄铜（二元）	H+铜含量	例如：H90、H65
复杂黄铜（三元以上）	H+第二主添加元素化学符号+除锌以外的元素含量（数字间以“-”隔开）	例如：HPb89-2、HFe58-1-1、HMn62-3-3-0.7
青铜	Q+第一主添加元素化学符号+除铜以外的元素含量（数字间以“-”隔开）	例如：QAl5、QSn6.5-0.1、QAl10-4-4
普通白铜（二元）	B+镍（含钴）含量	例如：B5、B30
复杂白铜（三元以上）	B+第二主添加元素符号+除铜以外的元素含量（数字间以“-”隔开）	例如：BZn15-20、BAl6-1.5、BFe30-1-1

①　铜含量随着顺序号的增加而降低。
②　元素含量为名义百分含量（以下同）。

表4.10-2　加工铜及铜合金牌号组成

分类	牌号组成	示例
纯铜	Cu-铜类型的大写字母①	例如：Cu-FRHC、Cu-FRTP、Cu-OF
铜合金	Cu+添加元素化学符号及其含量②	例如：CuZn37Pb1、CuCr1Zr、CuAl10Ni5Fe5

①　字母代号含意：ETP表示电解精炼韧铜；FRHC表示火法精炼高导电铜；FRTP表示火法精炼韧铜；OF表示无氧铜；HCP表示含磷高导电铜；DLP表示低磷脱氧铜；DHP表示高磷脱氧铜。
②　元素含量尽量取整数。当元素含量<1%时，不标注元素含量。

1.3　德国

在德国工业标准（DIN）中，有色金属材料的表示方法有两个体系。一种是以化学元素符号、标记字母和阿拉伯数字组成的牌号；另一种是7位数字代号系统。在现行的DIN技术标准文件中，两种体系并用，相互对照列出。

（1）以化学元素为基础的牌号表示方法

按DIN 1700—1954的规定，加工铜及铜合金的牌号一般有二种组成形式：

1）说明制造方法和应用范围的标记字母。例如表4.10-3中的纯铜；

2）直接标明合金的名义成分。例如表4.10-3中的铜合金。

表4.10-3　铜及铜合金的牌号组成

分类	牌号组成	示例
纯铜	铜类型的字母代号①+Cu（+导电率值②）	例如：E-Cu58、SW-Cu、OF-Cu
铜合金	Cu+添加元素化学符号及其含量③	例如：CuZn37Pb0.5、CuCrZr、CuAl10Ni5Fe4

①　字母代号含义：E表示含氧铜；OF表示无氧铜；SE表示微残余磷脱氧铜；SW表示低残余磷脱氧铜；SF表示高残余磷脱氧铜。
②　当对材料有导电率要求时，标记出导电率值（m/（Ω·mm²））。
③　当元素含量<1%时，不标注含量数值。

（2）数字代号表示方法

按 DIN 17007—1956 的规定，7位数字代号的形式如下：

X·XXXX·XX（即：组别号·类别号·附加号）

1）组别号　共分为10大组，铜及铜合金为第2组；

2）类别号　表示具体合金，主要根据材料的化学成分、制备方式而定；

3）附加号　用以标记诸如熔炼、浇注、热处理的方式及是否加工硬化和外形、表面状况等。铜及铜合金一般无附加号。

铜及铜合金的具体数字代号如表4.10-4所示。

表4.10-4　铜及铜合金的数字代号

分类	数字代号
纯铜	2.000 0～2.019 9
黄铜	2.020 0～2.044 9
特殊黄铜	2.045 0～2.059 9
备用	2.060 0～2.069 9
白铜	2.070 0～2.079 9
铜-镍合金	2.080 0～2.089 9
铜-铝合金	2.090 0～2.0999
铜-锡合金	2.100 0～2.115 9
铜-铅合金	2.116 0～2.118 9
备用	2.119 0～2.119 9
铜-银合金	2.120 0～2.122 9
备用	2.123 0～2.123 9
铜-铍合金	2.124 0～2.125 9
铜-镉合金	2.126 0～2.127 9
铜-钴合金	2.128 0～2.128 9
铜-铬合金	2.129 0～2.129 9
备用	2.130 0～2.130 9
铜-铁合金	2.131 0～2.131 9
铜-镁合金	2.132 0～2.134 9
铜-锰合金	2.135 0～2.138 9
含氧铜	2.139 0～2.139 9
备用	2.140 0～2.145 9
铜-磷合金	2.146 0～2.146 9
铜-钯合金	2.147 0～2.147 9
铜-铂合金	2.148 0～2.148 9
备用	2.149 0～2.149 9
铜-硒合金	2.150 0～2.150 9
铜-硅合金	2.151 0～2.153 9
铜-碲合金	2.154 0～2.154 9
备用	2.155 0～2.155 9
铜-钛合金	2.156 0～2.157 9
铜-锆合金	2.158 0～2.159 9
备用	2.160 0～2.179 9

1.4　美国

美国UNS编号制度（ASTM E527）规定，铜及铜合金均采用5位数字作为代号，表示为"C+×××××（五位数字）"，其中，加工铜为"C10000～C15999"，加工铜合金为"C16000～C79999"。这种代号系统是在过去3位数字代号的基础上，经美国材料与试验协会和美国机动工程师协会共同研究和发展而成的，并成为美国金属与合金统一数字代号制度（UNS）的构成部分。

加工铜及铜合金具体编号情况如表4.10-5所示。

表4.10-5　铜及铜合金UNS编号

分类	UNS编号
铜	C10100～C15815
高铜合金	C16200～C19900
铜-锌合金（黄铜）	C21000～C28000
铜-锌-铅合金（铅黄铜）	C31200～C38500
铜-锌-锡合金（锡黄铜）	C40400～C48600
铜-锡-磷合金（磷青铜）	C50100～C52480
铜-锡-铅-磷合金（含铅磷青铜）	C53400～C54400
铜-磷和铜-银-磷合金（铜焊合金）	C55180～C55284
铜-铝合金（铝青铜）	C60800～C64210
铜-硅合金（硅青铜）	C64700～C66100
其他铜-锌合金	C66300～C69710
铜-镍合金	C70100～C72950
铜-镍-锌合金（镍银）	C73500～C79830

1.5　日本

按日本工业标准（JIS）的规定，加工铜及铜合金的牌号用铜的英文Copper的首字母C加四位数字表示，即：C+××××（四位数字）。其表示方法与美国UNS编号基本相同（较之少一位数字）。

第一位数字表示合金系列，用1～9表示。各数字的含意如下：

1为纯铜、高铜系合金；2为铜锌系合金；3为铜锌铅系合金；4为铜锌锡系合金；5为铜锡系、铜锡铅系合金；6为铜铝系、铜硅系、特殊铜锌系合金；7为铜镍系、铜镍锌系合金；8、9尚未使用。

铜及铜合金加工产品的代号，是由其牌号和表示产品形状类别与用途的英文字头或缩写字母组成。

常用的表示加工产品形状类别与用途的英文字头或缩写字母如表4.10-6所示。

表4.10-6　铜及铜合金加工产品的类别符号

缩写字母	类别	缩写字母	类别
P	板、条、圆板	TD	拉制无缝管
PC	复合板	TW	焊接管
R	带	TWA	电弧焊接管
BE	挤制棒	S	挤压型材
BD	拉制棒	BR	铆钉材料
BF	锻制棒	FD	模锻件
W	拉制线材	FH	自由锻件
TE	挤制无缝管		

1.6　英国

英国对有色金属牌号没有制定统一的表示方法标准。从铜、铝、镁、镍等主要材料大类看，只有一些笼统的原则，

如加工铜及铜合金的牌号由表示金属或合金的名称、制造方法或产品形状、用途、性能等的英文词首字母和以数字表示的顺序号组成，即“铜类型的字母代号＋3位数字顺序号”。

字母代号代表的含义如下：C表示纯铜；CA表示铝青铜；CB表示铍青铜；CC表示铬青铜；CN表示铜镍合金（白铜）；CS表示硅青铜；CZ表示黄铜；NS表示锌白铜；PB表示磷青铜。

顺序号数字本身没有确定含义，仅表示同一系列中不同成分的金属和合金。

1.7 法国

法国标准（NFA02－009－1986）规定的加工铜及铜合金牌号，原则上由铜的化学元素符号和表示材料类型的字母代号或主要合金元素的元素化学符号及其名义含量成分数字组成，其原则与ISO1190/1的表示方法相同。

加工铜及铜合金牌号的组成如表4.10-7所示。

表4.10-7 铜及铜合金牌号组成

分类	牌号组成	示例
纯铜	Cu－铜类型的大写字母①	例如：Cu-FRHC、Cu-FRPT、Cu-OF
合金化铜	Cu＋添加元素化学符号（及其含量②）	例如：CuTeCuAg
铜合金	Cu＋添加元素化学符号及其含量③	例如：CuZn37Pb1、CuCr1Zr、CuAl10Ni5Fe5

① 字母代号含义：ETP表示电解精炼韧铜；FRHC表示火法精炼高导电铜；FRTP表示火法精炼韧铜；OF表示无氧铜；HCP表示含磷高导电铜；DLP表示低磷脱氧铜；DHP表示高磷脱氧铜。

② 一般不标注元素含量。下列情况应标注元素含量数值：当同一类合金化铜的添加元素含量不同时，为以示区别应标注；当添加元素含量（质量分数）接近1%时，应标注为1。

③ 元素含量＜1%时，不标注元素含量。

1.8 俄罗斯

俄罗斯标准（ГОСТ）中的铜及铜合金牌号，是以“化学元素或产品名称的俄文字母代号、元素含量或顺序号”表示。

加工铜及铜合金牌号的组成如表4.10-8所示。

表4.10-8 铜及铜合金牌号组成

分类	牌号组成	示例
纯铜	M＋顺序号①＋铜种类字母②	例如：M1、$M0_Ъ$、$M1_Ъ$
普通黄铜（二元）	Л＋铜含量	例如：Л90、Л80、Л63
复杂黄铜（三元以上）	Л＋除锌以外的各个主添加元素俄文字母代号＋除锌以外的元素含量（数字间以“－”隔开）	例如：ЛЖ$M_Ц$59-1-1、ЛС63-3、ЛО70-1
青铜	Бр＋各个主添加元素俄文字母代号＋除铜以外的元素含量（数字间以“－”隔开）	例如：БрОФ6.5-0.15、БрА $M_Ц$9-2、БрАЖН10-4-4
普通白铜	MH＋镍（含钴）含量	例如：MH5、MH25
复杂白铜（三元以上）	MH＋除镍以外的各个主添加元素俄文字母代号＋除铜以外的元素含量（数字间以“－”隔开）	例如：MHЖ$M_Ц$10-1-1、MH$M_Ц$40-1.5、MH$_Ц$15-20

① 铜的纯度随着顺序号的增加而提高。当顺序号为0时，铜的纯度随着“0”的个数的增加而提高；顺序号为非0数字时，铜的纯度随着顺序号的增加而降低。

② 字母代号以下标的形式标注。各字母代号的含意：Ъ表示无氧铜；P表示低磷脱氧铜；Φ表示高磷脱氧铜。

常用的铜及铜合金俄文字母代号如表4.10-9所示。

表4.10-9 铜及铜合金俄文字母代号

名称	代号	名称	代号	名称	代号
铝	A	镁	Mr	碲	T
铍	Б	白铜	MH	钛	T
青铜	Бр	锰	$M_Ц$	磷	Ф
铁	Ж	砷	$M_Ш$	铬	X
硅	K	镍	H	锌	Ц
镉	Kл	锡	O	锆	Цр
黄铜	Л	铅	C		
铜	M	银	Cp		

2 加工铜及铜合金牌号的对照

在我国加工铜及铜合金牌号中，T1、H59、HNi56-3、HFe58-1-1、HAl67-2.5、HAl66-6-3-2、HAl61-4-3-1、HMn62-3-3-0.7、HMn55-3-1、H85A、QAl9-5-1-1、QBe0.3-1.5、QSi3.5-3-1.5、QMn1.5、QMn2、QZr0.4、QCr0.5-0.2-0.1共17个牌号没有相应的国外牌号与之对应。

加工铜及铜合金相应牌号的对照见表4.10-10。由于各国使用的加工铜及铜合金类别上基本相近但又不完全一致，本对照表主要依据金属主成分或合金元素成分是否相同或相近而定，不苛求各元素的含量完全相同，因此，表4.10-10所列的各标准牌号是近似的对照，仅供参考。

表4.10-10　加工铜及铜合金牌号对照

材料类别	牌号							
	GB	JIS	ASTM	ISO	DIN	BS	NF	ГОСТ
纯铜	T2	C1100	C11000	Cu-FRHC	E-Cu58	C101/C102	Cu-FRHC	M1
	T3	—	—	Cu-FRTP	—	C104	Cu-FRTP	M2
无氧铜	TU0	C1011	C10100	—	—	C110	Cu-OFE	$M00_{б}$
	TU1	C1020	—	—	—	—	—	$M0_{б}$
	TU2	C1020	C10200	Cu-OF	OF-Cu	C103	Cu-OF	$M1_{б}$
磷脱氧铜	TP1	C1201	C12000	Cu-DLP	SW-Cu		Cu-DLP	$M1_{Р}$
	TP2	C1220	C12200	Cu-DHP	SF-Cu	C106	Cu-DHP	$M1_{Ф}$
银铜	TAg0.1	—	—	CuAg0.1	CuAg0.1	—	—	MC0.1
普通黄铜	H96	C2100	C21000	CuZn5	CuZn5	CZ125	CuZn5	Л96
	H90	C2200	C22000	CuZn10	CuZn10	CZ101	CuZn10	Л90
	H85	C2300	C23000	CuZn15	CuZn15	CZ102	CuZn15	Л85
	H80	C2400	C24000	CuZn20	CuZn20	CZ103	CuZn20	Л80
	H70	C2600	C26000	CuZn30	CuZn30	CZ106	CuZn30	Л70
	H68	—	C26200	CuZn30	CuZn33	—	—	Л68
	H65	C2680、C2700	C26800、C27000	CuZn35	CuZn36	CZ107	CuZn33	—
	H63	C2720	C27200	CuZn37	CuZn37	CZ108	CuZn36	Л63
	H62	C2800	C27400	CuZn40	CuZn40	CZ109	CuZn40	Л60
镍黄铜	HNi65-5	—	—	—	—	—	—	ЛН65-5
铁黄铜	HFe59-1-1	—	—	—	—	—	—	$ЛЖМ_{Ц}59$-1-1
铅黄铜	HPb89-2	—	C31400	—	—	—	—	—
	HPb66-0.5	—	C33000	—	—	—	—	—
	HPb63-3	C3560	C35600	—	CuZn36Pb3	—	—	ЛС63-3
	HPb63-0.1	—	—	—	CuZn37Pb0.5	—	—	—
	HPb62-0.8	C3710	C35000	CuZn37Pb1	CuZn36Pb1.5	CZ123	—	—
	HPb62-3	C3601	C36000	CuZn36Pb3	CuZn36Pb3	CZ124	CuZn36Pb3	—
	HPb62-2	—	C35300	CuZn37Pb2	CuZn38Pb1.5	CZ131	CuZn35Pb2	—
	HPb61-1	C3710	C37100	CuZn39Pb1	CuZn39Pb0.5	CZ129	CuZn40Pb	ЛС60-1
	HPb60-2	C3771	C37700	CuZn38Pb2	CuZn39Pb2	CZ128	CuZn38Pb2	ЛС60-2
	HPb59-3	C3561	C38500	CuZn39Pb3	CuZn39Pb3	CZ120	CuZn40Pb3	ЛС59-3
	HPb59-1	C3713	C37710	CuZn39Pb1	CuZn40Pb2	CZ129	CuZn39Pb1.7	ЛС59-1
铝黄铜	HAl77-2	C6870	C68700	CuZn20Al2	CuZn20Al2	CZ110	CuZn22Al2	$ЛАМ_{Ш}77$-2-0.05
	HAl60-1-1	—	—	CuZn39AlFeMn	—	—	—	ЛАЖ60-1-1
	HAl59-3-2	—	—	—	—	—	—	ЛАН59-3-2
锰黄铜	HMn58-2	—	—	—	CuZn40Mn2	—	—	$ЛМ_{Ц}58$-2
	HMn57-3-1	—	—	CuZn37Mn3Al2Si	—	CZ135	—	$ЛМ_{Ц}А57$-3-1
锡黄铜	HSn90-1	—	C41100	—	—	—	—	ЛО90-1
	HSn70-1	C4430	C44300	CuZn28Sn1	CuZn28Sn	CZ111	CuZn29Sn1	$ЛОМ_{Ш}70$-1-0.05
	HSn62-1	C4621	C46400	CuZn38Sn1	CuZn38Sn	CZ112	—	ЛО62-1
	HSn60-1	—	—	CuZn38Sn1	—	CZ113	CuZn38Sn1	ЛО60-1
加砷黄铜	H70A	—	C26130	CuZn30As	—	CZ105	CuZn30	—
	H68A	—	—	CuZn30As	—	CZ126	—	—

续表 4.10-10

材料类别	牌号							
	GB	JIS	ASTM	ISO	DIN	BS	NF	ГОСТ
硅黄铜	HSi80-3	—	C69400	—	—	—	—	ЛК80-3
锡青铜	QSn1.5-0.2	—	C50500	CuSn2	—	—	—	БрОФ2-0.25
	QSn4-0.3	C5101	C51100	CuSn4	CuSn4	PB101	CuSn4P	БрОФ4-0.25
	QSn4-3	—	—	CuSn4Zn2	—	—	—	БрОЦ4-3
	QSn4-4-2.5	—	—	—	—	—	—	БрОЦС4-4-2.5
	QSn4-4-4	C5441	C54400	CuSn4Pb4Zn3	—	—	CuSn4Zn4Pb4	БрОЦС4-4-4
	QSn6.5-0.1	C5191	C51900	CuSn6	CuSn6	PB103	CuSn6P	БрОФ6.5-0.15
	QSn6.5-0.4	C5191	C51900	CuSn6	CuSn6	PB103	CuSn6P	БрОФ6.5-0.4
	QSn7-0.2	—	—	CuSn8	CuSn8	PB103	CuSn8P	БрОФ7-0.2
	QSn8-0.3	C5210	C52100	CuSnP	CuSn8	—	CuSn8.5P	БрОФ8.0-0.3
铝青铜	QAl5	—	C60800	CuAl5	CuAl5As	CA101	CuAl6	БрА5
	QAl7	—	C61000	CuAl7、CuAl8	CuAl8	CA102	CuAl8	БрА7
	QAl9-2	—	—	CuAl9Mn2	CuAl9Mn2	—	—	БрАМц9-2
	QAl9-4	—	C62300	CuAl10Fe3	CuAl8Fe3	—	—	БрАЖ9-4
	QAl10-3-1.5	—	—	—	CuAl10Fe3Mn2	—	—	БрАЖМц10-3-1.5
	QAl10-4-4	—	C63020	—	—	CA104	CuAl10Ni5Fe4	БрАЖН10-4-4
	QAl10-5-5	C6301	C63280	CuAl10Ni5Fe4	CuAl10Ni5Fe4	CA105	CuAl10Ni5Fe4	БрАЖНМц9-4-4-1
	QAl11-6-6	—	—	—	CuAl11Ni6Fe5	—	CuAl11Ni5Fe5	—
铍青铜	QBe2	C1720	C17200	CuBe2	CuBe2	—	CuBe1.9	Бр·Б2
	QBe1.9	—	—	CuBe2	—	—	—	Бр·БНТ1.9
	QBe1.9-0.1	—	—	—	—	—	—	Бр·БНТ1Мг
	QBe1.7	C1700	C17000	CuBe1.7	CuBe1.7	CB101	CuBe1.7	Бр·БНТ1.7
	QBe0.6-2.5	—	C17500	CuCo2Be	CuCo2Be	C112	—	—
	QBe0.4-1.8	—	C17510	CuNi2Be	CuNi2Be	—	—	—
硅青铜	QSi3-1	—	C65500	CuSi3Mn1	—	CS101	—	БрКМц3-1
	QSi1-3	—	—	CuNi2Si	—	—	CuNi3Si	БрКН1-3
锰青铜	QMn5	—	—	—	—	—	—	БрМц5
锆青铜	QZr0.2	—	C15000	—	CuZr	—	—	—
	QZr0.4	—	—	—	—	—	—	—
	QCr0.5	—	C18400	CuCr1	—	CC101	—	БрХ1
铬青铜	QCr0.5-0.2-0.1	—	—	—	—	—	—	—
	QCr0.6-0.4-0.05	—	C18100	—	—	—	—	—
	QCr1	—	C18200	CuCr1	—	CC101	—	БрХ1
镉青铜	QCd1	—	C16200	CuCd1	—	C108	—	БрКд1
镁青铜	QMg0.8	—	—	—	CuMg0.7	—	—	—
铁青铜	QFe2.5	—	C19400	—	CuFe2P	—	—	—
碲青铜	QTe0.5	—	C14500	CuTe（P）	CuTeP	C109	—	（CuTeP）
普通白铜	B0.6	—	—	—	—	—	—	МН0.6
	B5	—	—	—	—	—	CuNi5	МН5
	B19	—	C71000			CN104	CuNi20	МН19
	B25	—	C71300	CuNi25	CuNi25	CN105	CuNi25	МН25
	B30	—	—	—	—	CN106	CuNi30	—

续表 4.10-10

材料名称	牌号							
	GB	JIS	ASTM	ISO	DIN	BS	NF	ГОСТ
铁白铜	BFe5-1.5-0.5	—	C70400	—	—	CN101	CuNi5Fe	МНЖ5-1
	BFe10-1-1	C7060	C70600	CuNi10Fe1Mn	CuNi10Fe1Mn	CN102	CuNi10Fe1Mn CuNi10Fe	МНЖМц10-1-1
	BFe30-1-1	C7150	C71500	CuNi30Mn1Fe	CuNi30Mn1Fe	CN107	CuNi30Mn1Fe CuNi30FeMn	МНЖМц30-1-1
锰白铜	BMn3-12	—	—	—	—	—	—	МНМц3-12
	BMn40-1.5	—	—	—	—	—	—	МНМц40-1.5
	BMn43-0.5	—	—	CuNi44Mn1	CuNi44Mn1	—	CuNi44Mn	МНМц43-0.5
锌白铜	BZn18-18	C7521	C75200	CuNi18Zn20	CuNi18Zn20	NS106	CuNi18Zn20	МНЦ18-20
	BZn18-26	C7701	C77000	CuNi18Zn27	CuNi18Zn27	NS107	—	МНЦ18-27
	BZn15-20	C7541	C75400	CuNi15Zn21	—	NS105	—	МНЦ15-20
	BZn15-21-1.8	C7941	—	—	—	—	—	—
	BZn15-24-1.5	—	—	—	—	—	CuNi13Zn23Pb1	—
铝白铜	BAl13-3	—	—	—	—	—	—	МНА13-3
	BAl6-1.5	—	—	—	—	—	—	МНА6-1.5

编写：孟惠娟（洛阳铜加工集团有限责任公司）

参考文献

1 赵祖德等编．铜及铜合金材料手册．北京：科学出版社，1993

2 田荣璋，王祝堂主编．铜合金及其加工手册．长沙：中南大学出版社，2002

3 中国航空材料手册编辑委员会编．中国航空材料手册：第4卷．第2版．北京：中国标准出版社，2002

4 刘淑云主编．铜及铜合金热处理．北京：机械工业出版社，1990

5 舟久保，熙康编．形状记忆合金．北京：机械工业出版社，1992

6 杨大智主编．智能材料与智能系统．天津：天津大学出版社，2000

7 李娜娜．铜钴铬硅电极合金的显微组织和性能．中南大学硕士学位论文，2004

8 宋练鹏．高强导电铜合金组织性能研究．中南大学博士学位论文，2004

9 范顺科等编．袖珍世界有色金属牌号手册．北京：机械工业出版社，2001

第 5 篇

镍、钴及其合金

主　编　唐仁政
主　审　田荣璋
编　写　唐仁政
审　稿　中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会

第1章　镍及镍合金概述

镍在元素周期表中属第Ⅷ族元素，具有面心立方结构，晶格常数 α = 0.352 3 nm。它的特点是：熔点比较高（1 455℃），耐蚀性好，力学性能高，在冷、热状态下都有很好的压力加工性能，并具有一些特殊的物理性能，如铁磁性、磁致伸缩性、高的电真空性能等，因而在工业上得到广泛的应用。

1　纯镍中的杂质与纯镍的牌号

通常在纯镍中总是含有一定数量的杂质，如铁、钴、铜、硅、锰、镁、镉、锌、锡、铅、砷、锑、铋、碳、硫、磷、氢、氧等，其中铅、砷、锑、铋、硫、磷、氢、氧等是有害杂质，它们一般都损害镍及镍合金的加工性能和力学性能。其他杂质，如铁、钴、铜、硅、锰等，则危害性较小，在标准规定的含量范围内，仅稍微提高强度并降低导电性。

纯镍根据不同用途分为加工用纯镍和电镀用阳极镍。其牌号与成分见表5.1-1和表5.1-2。

表5.1-1　加工纯镍的化学成分与牌号

牌号	代号	化学成分（质量分数）/%															
		Ni + Co ≥	杂　质≤														
			Fe	Si	Mg	Mn	Cu	Pb	S	C	P	Bi	As	Sb	Zn	Cd	Sn	总和
二号镍	N2	99.98	0.007	0.003	0.003	0.002	0.001	0.000 3	0.001	0.005	0.001	0.000 3	0.001	0.000 3	0.002	0.000 3	0.001	0.02
四号镍	N4	99.9	0.04	0.03	0.01	0.002	0.015	0.001	0.001	0.01	0.001	0.001	0.001	0.001	0.005	0.001	0.001	0.1
六号镍	N6	99.5	0.1	0.15	0.10	0.05	0.10	0.002	0.005	0.10	0.002	0.002	0.002	0.002	0.007	0.002	0.002	0.5
七号镍	N7	99.3	0.15	0.15	0.10	0.20	0.15	—	0.015	0.15	—	—	—	—	—	—	—	0.7
八号镍	N8	99.0	0.30	0.15	0.10	0.20	0.15	—	0.015	0.02	—	—	—	—	—	—	—	1.0

表5.1-2　电镀用阳极纯镍的化学成分与牌号

牌　号	代号	化学成分（质量分数）/%									用途特征
		主要成分			杂质≤						
		Ni + Co≥	Cu	S	O	Fe	Si	Mg	C	总和	
一号阳极镍	NY1	99.7	0.1	0.005	—	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	用于pH值小、不易钝化的电镀条件
二号阳极镍	NY2	99.4	0.01 ~ 0.10	0.002 ~ 0.01	0.03 ~ 0.3	0.1	0.1	—	—	0.6	用于pH值范围大、电镀件形状复杂的条件
三号阳极镍	NY3	99	0.15	0.005	—	0.25	0.2	0.1	0.1	1.0	用于一般的电镀条件

从表5.1-2中可见，电镀用的阳极纯镍中，允许微量的硫和氧，这是由于电镀用的阳极镍要求在电镀过程中溶解均匀，产生的阳极泥少，能保证镀层表面光滑、分布均匀，与金属结合牢固等。但阳极镍在电镀过程中发生的钝化现象，会造成溶解不均匀及产生过多的阳极泥，从而使镀层质量降低，如果含有0.002%以上的硫，能消除阳极镍的钝化现象。因为镍中的硫主要是以硫化镍的形式存在，它与镍形成微电池，破坏了阳极镍上的钝化膜，以保证阳极镍的均匀溶解，因此有时在电镀用纯镍中还有意地加入少量硫。在镍中含有微量铜，形成的硫化铜也可以与镍形成微电池破坏钝化膜，保证阳极均匀溶解，提高电镀质量。

2　纯镍的物理性能

1）密度　镍的密度随纯度的不同而略有变化，当镍中含有碳、硅、氧、氢等杂质时，密度降低。纯度为99.98%的镍，密度为8.91 g/cm^3，纯度为99.5%的镍密度为8.89 g/cm^3。

2）熔点和熔化潜热　镍的熔点也和纯度有关，纯度为99.98%的镍熔点为1 455℃，熔化潜热为308.8 J/g。纯度为99.5%的镍熔点为1 450℃。

3）沸点与蒸气压　在大气压力下镍的沸点为2 737℃。在真空中镍从750℃开始即有蒸发，在大约400 Pa的真空中，镍的沸点约为2 340℃，在133 Pa的真空中则只有1 907℃。

镍的蒸气压与温度有关，在熔点1 450℃温度下的蒸气压为1.25 Pa。

4）比热容　不同温度下，镍的比热容见表5.1-3。

表5.1-3　镍在不同温度范围内的比热容

温度范围/℃	22 ~ 450	22 ~ 500	22 ~ 550	22 ~ 600	22 ~ 700	22 ~ 800	22 ~ 900	22 ~ 1040
平均比热容/J·(g·K)$^{-1}$	0.501 2	0.503 7	0.507 4	0.510 8	0.520 0	0.531 7	0.543 4	0.555 2

在高温下镍的真实比热容（J·g^{-1}·K^{-1}）可按下式计算

$$C_P = 0.4982 + 122.25 \times 10^{-6} t$$

式中，t 为温度，℃；

低温下镍的比热容见表 5.1-4。

表 5.1-4 低温下镍的比热容

温度/℃	0	-16.5	-69.9	-175	-177.9	-205.3	-247.4
平均比热容 /J·(g·K)$^{-1}$	0.444 6	0.420 8	0.381 8	0.234 9	0.222 7	0.133 6	0.086 2

5）热导率 和其他金属一样，镍的热导率也随纯度的降低而减小。一般工业电解镍纯度约为 99.9%，在 20～100℃温度范围内，其热导率约为 59.79 W/（m·K）。热导率也随温度而变化。不同纯度的镍在不同温度下的热导率见表 5.1-5。

表 5.1-5 不同纯度镍在不同温度的热导率

温度/℃	热导率/W·（m·K）$^{-1}$		
	纯度/%		
	99.942	99.1	一般工业纯
100	82.90	60.70	64.90
200	73.27	—	59.87
300	62.80	53.59（290℃）	54.85
400	59.45	—	52.34
500	58.20	—	54.85

6）线胀系数 镍的线胀系数也与纯度有关，纯度越高，线胀系数越大；随温度增高，线胀系数也增大，但在磁性转变温度附近发生突变，如图 5.1-1 所示。在 0～310℃时，镍的线胀系数缓慢增加；在 340℃附近急剧增加，当继续升高温度至 370℃左右，线胀系数又下降；随后随温度升高至 500℃左右，又重新缓慢增加。工业纯镍在不同温度范围的线胀系数见表 5.1-6。

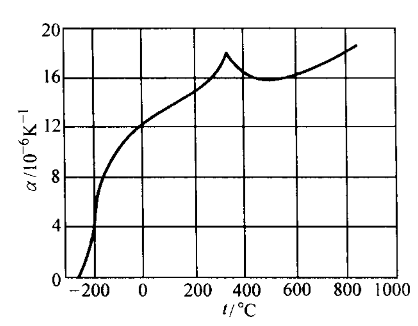


图 5.1-1 镍的线胀系数与温度的关系

表 5.1-6 工业纯镍在不同温度的线胀系数

温度/℃	25～100	25～300	25～600	100～200	200～300	300～350
平均线胀系数 /10^{-6}K^{-1}	13.3	14.4	15.5	14.4	15.4	17.2

温度/℃	350～400	400～500	500～600	700～800	800～900
平均线胀系数 /10^{-6}K^{-1}	16.4	15.9	17.1	17.7	18.6

纯度为 99.98%的镍在不同温度的线胀系数见表 5.1-7。

表 5.1-7 纯度为 99.98%的镍在不同温度下的线胀系数

温度/℃	0	300	370	390	400	600
平均线胀系数 /10^{-6}K^{-1}	13.5	16.6	26.0	15	17.6	17.8

7）电阻及电阻温度系数 和所有金属一样，镍的纯度对电阻率和电阻温度系数有影响显著，随着纯度的提高，电阻率降低，电阻温度系数增加。表 5.1-8 为几种不同纯度镍的电阻率和电阻温度系数。

表 5.1-8 镍的纯度对电阻率及电阻温度系数的影响

镍的纯度 /%	温度范围 /℃	电阻率 /μΩ·m	电阻温度系数 /K^{-1}
99.98～99.99	0～100	0.061 41	0.006 82
99.94	0～100	0.072 36	0.006 70
99.8	20～50	0.075 5～0.076 0	0.005 59
99.0	20～50	0.094 8～0.113 3	0.004 5～0.005 10

温度对镍的电阻率和电阻温度系数的影响很大，表 5.1-9 为 99.35%镍的电阻率和电阻温度系数与温度的关系。

表 5.1-9 工业纯镍的电阻率及电阻温度系数与温度的关系

温度/℃	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000
电阻率 /μΩ·m	0.082	0.120	0.175	0.258	0.330	0.370	0.405	0.440	0.473	0.510	0.556
电阻温度系数 /10^{-4}K^{-1}	46.3	45.8	32.2	27.9	12.1	9.46	8.65	7.50	7.80	7.85	—

3 纯镍的力学性能

一般工业纯镍的力学性能见表 5.1-10 和表 5.1-11。

表 5.1-10 纯镍的基本力学性能

性　能	材料状态	数据
抗拉强度 σ_b/MPa	退火 冷加工	294～588 490～882
伸长率 δ/%	退火 冷加工	10～30 2～20
屈服点 σ_s/MPa	退火 冷加工	117.6 686
布氏硬度 HB	退火 冷加工	90～120 120～240
弹性极限 σ_e/MPa	退火	78.4
弹性模量 E/GPa		210～230
切变模量 G/MPa		71 540
冲击韧度 α_K/J·cm^{-2}	退火	31

表 5.1-11 工业纯镍 N6 的疲劳强度

材料状态	规定循环周次时的疲劳强度 σ_N/MPa			
	10^5	10^6	10^7	10^8
板材，厚 5.08 mm				
退火	312.6	240.1	185.2	156.8
半硬，加工率 37%	—	336.1	281.3	274.4
硬，加工率 60%	—	—	295.0	281.3
棒材，ϕ12.7 mm				
退火				192.1～212.7
热轧				157.8～171.5
冷拉				260.7～308.7
冷拉后，270℃消除应力退火				233.2～260.7
挤压棒材				
退火	356.7	274.4	233.2	226.4
冷拉	576.2	432.2	356.7	343.0

工业纯镍的力学性能与温度及加工热处理条件的关系，如图 5.1-2 ~ 图 5.1-12 所示。

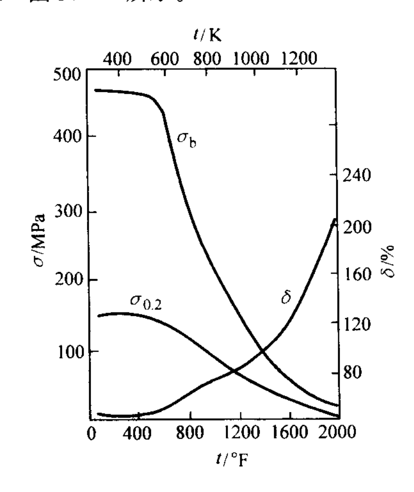


图 5.1-2　Ni（退火状态）的高温短时拉伸性能

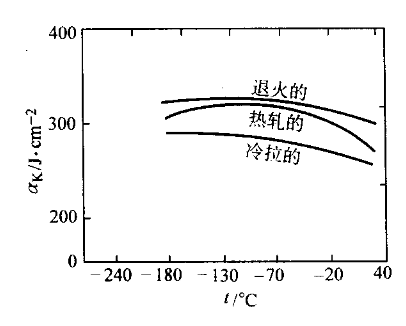


图 5.1-3　Ni 的低温冲击韧性

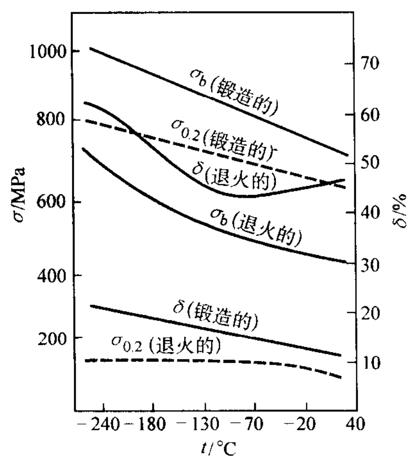


图 5.1-4　Ni 的低温力学性能

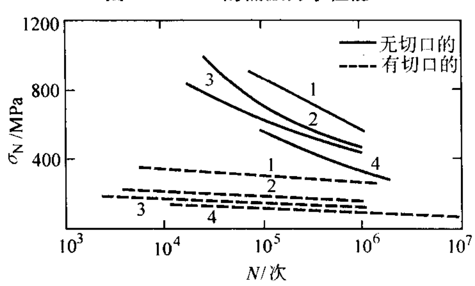


图 5.1-5　低温对 Ni 板材疲劳强度的影响

切口系数：$K_t = 3.0$

试验温度：1—－255℃；2—－195℃；3—－79℃；4—20℃

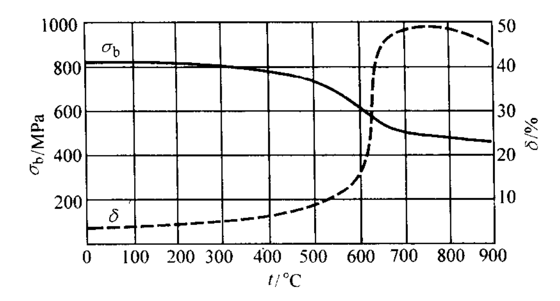


图 5.1-6　Ni 的力学性能与退火温度的关系

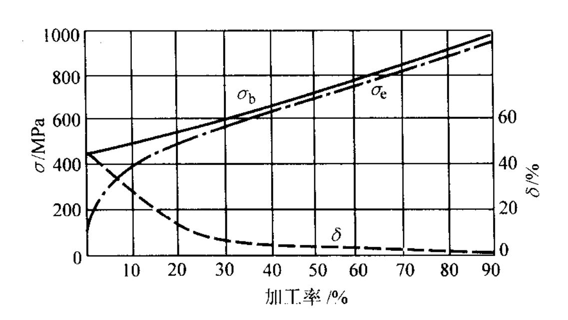


图 5.1-7　Ni 的力学性能与加工率的关系

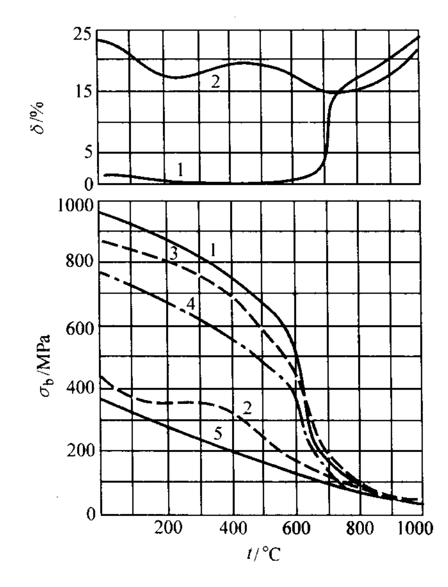


图 5.1-8　Ni 在高温时力学性能的变化

1—N7，直径 0.625 mm（经 73%冷加工）未退火线材；2—N7，直径 0.625 mm 经 73%冷加工后经 800℃，30 min 退火线材；3—N7，直径 0.625 mm（经 38%冷加工）未退火线材；4—N7，直径 0.625 mm（在 400℃热轧制，加工率 38%）未退火线材；5—N4，直径 0.043 mm 经 61%冷加工后经 1 000℃退火线材

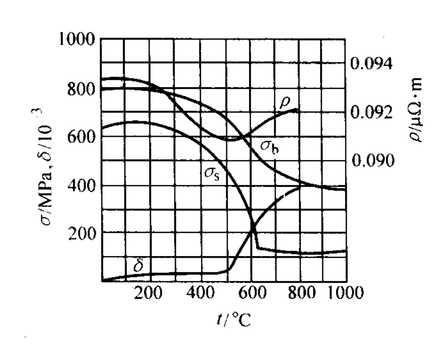


图 5.1-9　纯镍的力学性能、电阻率与退火温度的关系

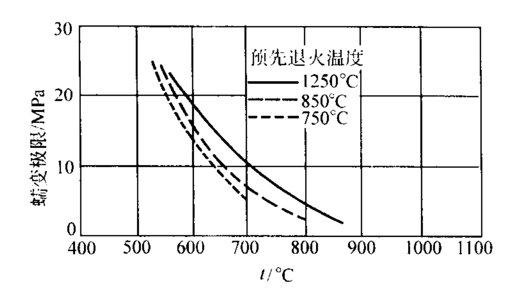


图 5.1-10 Ni的蠕变极限与温度的关系（材料在各温度预先短时退火）

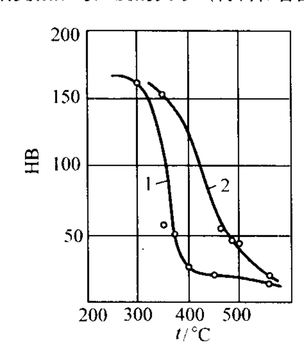


图 5.1-11 纯镍的硬度与温度的关系

1—电解镍、99.99%Ni；2——一般电解镍

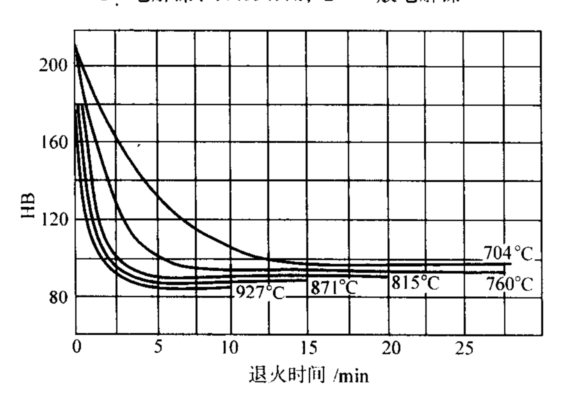


图 5.1-12 纯镍的硬度与退火工艺的关系

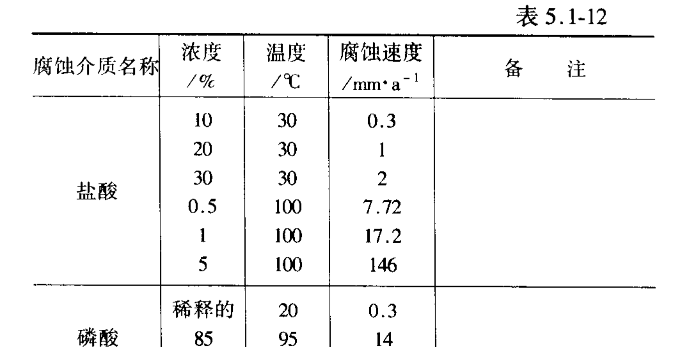
4 纯镍的化学性能

镍的化学稳定性较高，在许多介质中均具有良好的耐蚀性。其标准电极电位为 - 0.25 V，比铁正，比铜负。镍在稀的非氧化性酸中（例如 HCl、H_2SO_4 中），且在没有溶解氧的情况下，镍的耐蚀性较好，特别是在中性和碱性溶液中耐蚀性良好。这是因为镍有钝化能力，在表面形成了一层致密的保护膜，阻止了镍的继续氧化。但镍在浓盐酸、硝酸和亚硝酸中极不稳定，纯镍在部分无机酸、各种盐类溶液、有机酸和有机溶剂中的腐蚀速度见表 5.1-12 ~ 表 5.1-14。

表 5.1-12 纯镍在部分无机酸中的腐蚀速度

腐蚀介质名称	浓度 /%	温度 /℃	腐蚀速度 /mm·a⁻¹	备 注
硫酸	5	30	0.06	当搅动溶液和溶液被空气饱和时，腐蚀速度显著增加
	5	60	0.24	
	5	102	0.84	
	10	20	0.043	
	10	77	0.3	
	10	103	3	
	20	20	0.1	
	20	105	2.82	
	95	20	1.8	

表 5.1-12



腐蚀介质名称	浓度 /%	温度 /℃	腐蚀速度 /mm·a⁻¹	备 注
盐酸	10	30	0.3	
	20	30	1	
	30	30	2	
	0.5	100	7.72	
	1	100	17.2	
	5	100	146	
磷酸	稀释的	20	0.3	
	85	95	14	
	稀释的	80	20	

表 5.1-13 纯镍在各种盐类溶液中的腐蚀速度

腐蚀介质名称	浓度 /%	温度 /℃	腐蚀速度 mm·a⁻¹	备 注
中性和碱性盐（硫酸盐、盐酸盐、硝酸盐、醋酸盐、碳酸盐）溶液	—	加热	0.013	
氯化钠	饱和溶液	95	0.53	中性溶液
氯化铝	28 ~ 40	102	0.21	由水解产生的酸性溶液
氯化锌	8 ~ 20	38	0.12	
硫化氢溶液	饱和溶液	25	0.048	
硫酸铝	25 57	35 115	0.015 1.5	由水解产生的酸性溶液
硫酸锌	—	105	0.64	由水解产生的酸性溶液
硫酸锰	饱和溶液	113	0.074	由水解产生的酸性溶液
氯化锰	11.5	101	0.22	酸性溶液

表 5.1-14 纯镍在有机酸和有机溶液中的腐蚀速度

腐蚀介质名称	浓度 /%	温度 /℃	腐蚀速度 /mm·a⁻¹	备 注
醋酸	6	30	0.1	吹风时腐蚀速度显著增加
	50	20	0.25	
	5	沸腾	0.28	
	50	沸腾	0.48	
	99.9	沸腾	0.364	
脂肪酸	—	227	0.1	油酸和硬脂酸
石碳酸	—	53	0.001 8	
水果汁：蕃茄汁	天然的	20	0.3	
	天然的	90	0.51	
柠檬汁	天然的	20	0.013	
	天然的	100	0.36	
葡萄汁	天然的	20	0.16	
	天然的	100	0.17	
四氯化碳	带有水分	25	0.000 5	若没有水分，甚至在沸腾时，耐蚀性还相当高
二氯乙烯	同上	25	0.000 3	
三氯乙烯	同上	25	0.01	
三氯甲烷	同上	25	0.001 5	

不论是在酸或盐类溶液中溶解有氧（空气）或氧化剂都会加快镍的腐蚀速度。图 5.1-13 是盐酸中溶解有空气时，对镍的腐蚀速度的影响。

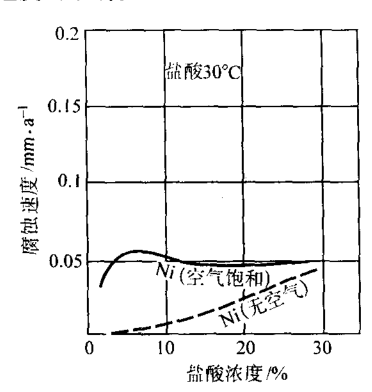


图 5.1-13 30℃盐酸中溶解的空气对镍腐蚀速度的影响

镍在常温空气中不易氧化，在 500℃左右的空气中轻微氧化，在 750℃以上则迅速氧化。

镍与氧反应后生成的氧化物主要是氧化亚镍（NiO）及氧化镍（Ni_2O_3）。氧化亚镍在 230℃以上很容易被氢还原；在 250℃～300℃则开始被一氧化碳还原，在 700℃～800℃以上，还原更为迅速完全。

当空气中含有二氧化硫和硫化氢时，镍被腐蚀，腐蚀速度为 0.001～0.004 mm/a；在海洋性大气中腐蚀速度为 0.000 1～0.000 13 mm/a。

在干燥的氧化氮、二氧化硫和氨气、氯气中，室温下镍不被腐蚀，但在潮湿情况下，腐蚀速度显著增加。

镍在天然淡水中是耐蚀的；在含有硫化物的水中，镍有轻微腐蚀，表面变暗；在含有大量氯离子和二氧化硫的水中，镍会发生点腐蚀；在被空气和二氧化碳所饱和的、温度为 120℃的蒸汽冷凝水中，镍的腐蚀速度显著增加到 0.22 mm/a；镍在海水中的腐蚀速度平均为 0.13 mm/a。

5 镍的用途

镍在地壳中的储量较少，我国的镍资源更为缺乏。据 2001 年有关统计，世界镍的地质储量为 5 800 万吨，中国为 370 万吨。

镍的产量和消耗情况：据有关资料，2002 年世界原生镍产量为 117.98 万吨，2003 年为 123.78 万吨。2002 年世界镍的消耗量为 116.8 万吨，2003 年消耗 125.7 万吨。

我国 2003 年生产电解镍 6.7 万吨，还进口 6.72 万吨，年消耗近 14 万吨，其中 9.5 万吨用于生产不锈钢及其他合金钢。

镍的消耗主要是生产不锈钢，2003 年全世界生产不锈钢用镍 76 万吨，占整个镍消耗量的 60.5%；其他合金钢生产用镍约占 10%；只有约 12% 的镍是用于生产镍基合金（西方国家统计是将含 Ni 量大于 30%的合金都计为镍合金）。约 2%的镍是用来生产镍基合金以外的非铁金属合金，特别是铜合金；还有约 15%的镍是用于电镀和其他用途。

6 镍合金的特性与分类

当今工业领域使用镍合金主要是由于它具有以下三方面的特性。首先是耐蚀性良好，特别是对潮湿的或是高温气体腐蚀介质所具有的良好耐蚀性；其次是镍合金具有的抗高温蠕变性能，镍基高温合金是目前最重要的高温合金；第三方面是镍合金具一些独特的稳定的物理性能，如软磁性、电真空性能、电热性能等。当然不是所有镍合金都同时具有上述三方面的特性，而是不同成分系列的合金具有相应的不同特性。

镍合金的分类可按其特性和应用领域分为耐腐蚀镍合金、耐高温镍合金和具有特殊物理性能的功能镍合金（包括：软磁合金、弹性合金、电阻合金、膨胀合金、测温合金、电真空用合金等）。

耐腐蚀镍合金的应用领域主要是化学化工、发电机抗湿腐蚀部件（如进水加热器和蒸汽管道等），污染控制设备（如废气除硫设备等），这些耐腐蚀镍合金用量约占镍合金总消耗量的 30%，其余船舶和海洋工程用耐蚀镍合金占 10% 左右。

重要的高温领域，如飞机发动机、发电汽轮机以及工业炉等的高温部件用镍基高温合金约占镍合金总量的 20%；高温镍合金是目前制造航空发动机及发电汽轮机的最主要的结构材料，对实现国防现代化具有十分重要的战略意义。因此尽管产量不是很大，但是镍基高温合金是最受重视、研究得最深入的镍基合金。软磁材料以及可控膨胀合金、弹性合金等功能镍合金占镍合金总消耗量的 20%左右，其余则用作电热元件、汽车火花塞电极、人造金刚石触媒、铸币等。

镍合金主要以变形材料使用，也有部分铸造合金，如化工、电力工业的某些部件，涡轮发动机叶片等。

我国生产镍合金的企业，主要是一些特殊钢厂和相关的研究院所，例如抚顺特殊钢集团公司、四川长城特殊钢公司、大连钢铁集团有限公司、上海五钢有限公司、首钢冶金研究院、上海钢铁研究所、陕西钢铁研究所、北京钢铁研究总院等。

编写：唐仁政（中南大学）
审稿：田荣璋（中南大学）

第2章　耐腐蚀镍合金

1　概述

镍基耐蚀合金通常是在部件的工作环境恶劣的条件下使用，不锈钢在这种环境下腐蚀速度太快，钛及钛合金又价格昂贵；而非金属材料（如高分子材料）的耐磨性差、磨蚀速度太快、或者强度太低、承受的工作温度太低而导致使用寿命也不高。这种情况下只有采用镍基耐蚀合金，其应用领域包括化工行业中各种腐蚀介质的处理、输送、贮存等设备；环保工程中接触腐蚀介质的装备，如废气的除硫装置；还有船舶和海洋工程中许多要求耐海水或海洋潮湿大气腐蚀的部件等。

对于一般结构材料通常都有确定的力学性能指标，在选用材料时可根据设计所要求的性能标准和材料的力学性能指标来确定应该选用何种材料。但是耐腐蚀材料情况有所区别，材料的耐腐蚀性能如在某种介质中的腐蚀速度、晶间腐蚀、点腐蚀等，都反映材料在试验条件下与介质之间的反应行为的过程与结果，不宜作为材料的本征性能数据。因此在选用耐腐蚀材料时，只有根据设计提出的条件要求，选择相近条件下的腐蚀性能结果进行分析判断，决定选用什么材料，有时也需要在所要求的介质中进行试验，来决定何种合金可以使用或不能使用。不过通常根据已有的资料和经验，也可以作出在何种腐蚀介质中应该使用何种合金的结论。

对于镍基耐蚀合金，除了耐蚀性以外，可焊性是另一个重要特性，而且应该要求采用普通焊接方法时，材料是可焊的。否则，容器、管道、沟槽、法兰件等就不能制造出来，也无法连接，材料也就没有实际使用价值了；另外，在很多情况下，材料应具有适当的强度。

镍的标准电极电位比铁高（较正）；镍的腐蚀产物比铁的腐蚀产物更致密，保护作用较大；镍的钝化性能也比铁好。镍还有一个重要特点，就是能和一些耐蚀性能优良的元素形成固溶体，而且固溶度比较大，例如Cu与Ni能无限互溶，Cr、Mo、W在Ni中的固溶度分别为35%、20%、28%。因此，向Ni中加入这些元素，可得到一系列镍基耐蚀合金，这些合金既保持了镍的优良特性，又兼有合金化元素的良好性能。例如Cr在氧化性介质中可形成稳定的钝化膜，从而有优良的耐蚀性，而Mo则在还原性介质中有较高的稳定性，当Cr和Mo同时加入镍中形成的镍合金，则分别具有了Cr、Mo的这些特性，而且在一定范围内，随Cr、Mo含量的增加，合金的腐蚀速度几乎成直线下降。

镍基耐蚀合金除了具有优良的耐蚀性能之外，还具有强度高，塑性好，可冷、热加工变形，可焊接等，从而广泛应用于化工、石油、湿法冶金、原子能、海洋开发、环保技术、航空、船舶等工业领域，成为重要的不可缺少的耐腐蚀材料。

镍基耐蚀合金可按成分、用途、性能特点等分类，本章按成分分类，主要有镍铜系、镍铬系、镍钼系、镍铬钼系、镍铬钼铜系。由于镍的价格比较贵，为了尽量节约镍，所以还有镍含量大于30%，而铁、镍之和大于50%的铁镍基耐蚀合金，也有称为高镍耐蚀合金。为了便于读者在选用材料时对比，本章也将部分铁镍基耐蚀合金的成分与主要性能列出，有关铁镍基耐蚀合金更详细的资料，在本大典第3卷中介绍。

关于耐蚀合金的牌号与分成，各国标准规定的成分没有完全统一，有的成分差别还较大。我国国标规定的成分只有部分能与国际牌号基本对应。

我国GB/T 15007—1994标准规定的耐蚀合金牌号的表示方法是：采用汉语拼音字母符号“NS”作前缀，“N”、“S”分别为“耐”、“蚀”两字的汉语拼音的第一个字母。NS后面有三个阿拉伯数字，第一个数字表示分类，即：

NS1××——表示固溶强化型铁镍基合金；
NS2××——表示沉淀强化型铁镍基合金；
NS3××——表示固溶强化型镍基合金；
NS4××——表示沉淀强化型镍基合金。

第二个数字表示合金系列（即主要合金元素）例如：

NS11×——表示铁镍铬系；
NS12×——表示铁镍钼系；
NS13×——表示铁镍铬钼系；
NS14×——表示铁镍铬钼铜系；
NS31×——表示镍铬系；
NS32×——表示镍钼系；
NS33×——表示镍铬钼系；
NS34×——表示镍铬钼铜系。

第三个数字表示各系列合金顺序号。

为了参照对比，本章将我国与美国牌号列出。在对照时只能根据成分基本接近的合金找出对应的牌号，并参比有关性能。

2　镍铜系耐蚀合金

2.1　镍铜系耐蚀合金的牌号与成分

镍铜系耐蚀合金也称蒙乃尔合金（即美国Monel型合金）。在GB/T 15007—1994标准中不包括此类耐蚀合金。我国与国外对应的牌号和化学成分见表5.2-1。

表5.2-1　镍铜系耐蚀合金的成分与牌号

牌号	化学成分（质量分数）/%							对应美国商品名称
	Ni	Cu	Fe	C	Si	Mn	其他	
Ni66Cu30	>63	28~34	≤2.5	≤0.30	≤0.50	≤2.0	—	Monel 400
Ni70Cu28S	63~70	余	≤2.5	≤0.30	≤0.50	≤2.0	0.025~0.060S	Monel R405
Ni70Cu28AlTi	63~70	余	≤2.0	≤0.25	≤0.50	≤1.5	2.30~3.15Al 0.35~0.85Ti	Monel K500
Ni70Cu28Al	≥63	27~33	≤2.0	≤0.10	≤0.50	≤1.5	2.3~3.5Al Ti<0.5	Monel 502

除上述四种合金外，我国GB/T 5235—1985还规定了两种镍铜合金，成分与牌号见表5.2-2。

表5.2-2　镍铜合金的主要化学成分（摘自GB/T 5235—1985）

合金牌号	主要化学成分（质量分数）/%							
	Ni+Co	Cu	Si	Mn	Fe	C	S	P
NCu40-2-1	余量	38~42	≤0.15	1.25~2.25	0.2~1.0	≤0.30	≤0.02	≤0.005
NCu28-2.5-1.5	余量	27~29	≤0.10	1.2~1.8	2.0~3.0	≤0.20	≤0.02	≤0.005

上述的几种镍铜合金中由于Ni70Cu28AlTi以及Ni70Cu28Al

两个合金含有 Al、Ti，合金中有 γ' 相（Ni_3Al），还有少量 TiC 相。属于沉淀硬化型合金，其余都是单相固溶体合金。

2.2 镍铜系耐蚀合金的物理性能（表 5.2-3）

表 5.2-3 镍铜系耐蚀合金的部分物理性能

合金	密度 /g·cm^{-3}	液相线温度 /℃	固相线温度 /℃	比热容（室温）/J·(kg·K)$^{-1}$	导电率（室温）/%IACS
Ni66Cu30	8.83	1 349	1 299	427	3.4
Ni70Cu28S	8.83	1 350	1 300	427	3.4
Ni70Cu28AlTi	8.47	1 350	1 315	419	2.8
Ni70Cu28Al	8.44	1 350	1 315	419	2.8

合金热导率、电阻率和热膨胀系数都与温度有关，Ni66Cu30 和 Ni70Cu28S 两合金，以及 Ni70Cu28AlTi 和 Ni70Cu28Al 两合金的成分都比较接近，所以它们的这些物理性能也基本相同。表 5.2-4、表 5.2-5、表 5.2-6 为它们在不同温度的热导率、电阻率、线胀系数。

表 5.2-4 Ni66Cu30 和 Ni70Cu28S 合金的热性能和电性能

温度/℃	平均线胀系数 /10^{-6}K^{-1}	热导率 /W·(m·K)$^{-1}$	电阻率 /μΩ·m
- 184	11.0	16.3	—
- 129	11.5	18.8	—
- 73	12.1	20.0	—
21	—	21.8	0.510
93	13.1	24.1	0.535
204	15.5	27.8	0.560
316	15.8	31.0	0.575
427	16.0	34.3	0.590
538	16.4	38.1	0.610
649	16.7	41.4	0.630
760	17.3	44.9	0.650
871	17.6	48.3	0.670
982	18.0	51.9	0.690
1 093	18.5	—	0.710

表 5.2-5 Ni70Cu28S 的线胀系数

温度范围/℃	21 ~ 93	21 ~ 260	21 ~ 538
线胀系数/10^{-6}K^{-1}	13.9	15.7	16.4

表 5.2-6 Ni70Cu28AlTi 及 Ni70Cu28Al 合金的热性能和电性能

温度/℃	平均线胀系数 /10^{-6}K^{-1}	热导率 /W·(m·K)$^{-1}$	电阻率 /μΩ·m
- 196	11.2	—	0.550
- 157	11.7	12.4	—
- 129	12.2	13.3	—
- 73	13.0	14.9	—
21	—	17.4	0.615
93	13.7	19.6	0.618
204	14.6	22.5	0.628
316	14.9	25.7	0.640
427	15.3	28.6	0.648
538	15.7	31.7	0.653
649	16.4	34.6	0.658
760	16.7	37.8	0.665
871	17.3	40.7	0.678

2.3 镍铜系耐蚀合金的力学性能

2.3.1 Ni66Cu30 合金的力学性能

表 5.2-7 ~ 表 5.2-9 以及图 5.2-1 ~ 5.2-5 分别为 Ni66Cu30 合金在各种状态下的力学性能。

表 5.2-7 Ni66Cu30 合金的拉伸性能

品种和状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%
棒材			
退火	517 ~ 621	172 ~ 345	60 ~ 35
热精整	552 ~ 758	276 ~ 690	60 ~ 30
冷拉并消除应力退火	579 ~ 827	379 ~ 690	40 ~ 22
中厚板			
热轧	517 ~ 655	276 ~ 517	45 ~ 30
退火	483 ~ 586	193 ~ 345	50 ~ 35
薄板			
退火	483 ~ 586	172 ~ 310	50 ~ 35
冷加工	690 ~ 827	621 ~ 758	15 ~ 2
带材			
退火	483 ~ 586	172 ~ 310	50 ~ 35
弹簧回火	586 ~ 827	379 ~ 690	35 ~ 15
管材			
冷拉并退火	483 ~ 586	172 ~ 310	50 ~ 35
消除应力	586 ~ 827	379 ~ 690	35 ~ 15
线材			
退火	483 ~ 655	207 ~ 3 79	45 ~ 25
弹簧回火	1 000 ~ 1 241	862 ~ 1 172	5 ~ 2

表 5.2-8 Ni66Cu30 合金典型的拉伸和压缩性能

材料状态	拉伸				压缩	
	σ_b /MPa	$\sigma_{0.01}$ /MPa	$\sigma_{0.02}$ /MPa	伸长率 δ/%	$\sigma_{0.01}$ /MPa	$\sigma_{0.02}$ /MPa
热轧	579	255	283	39.5	228	262
冷拉消除应力	669	517	600	27.0	400	558
冷拉退火	538	193	228	44.0	131	193

表 5.2-9 Ni66Cu30 合金的冲击值

材料状态	悬臂梁式冲击吸收功 /J	摆锤式冲击吸收功（V 缺口）/J
热轧	136 ~ 163	298
锻造	102 ~ 156	—
冷拉	102 ~ 156	203
退火	122 ~ 163	291

Ni66Cu30 合金在不同温度下的高温拉伸性能如图 5.2-1，合金经 20%冷拉及 538℃8 h 消除应力退火后，其蠕变性能和断裂寿命如图 5.2-2 及图 5.2-3。

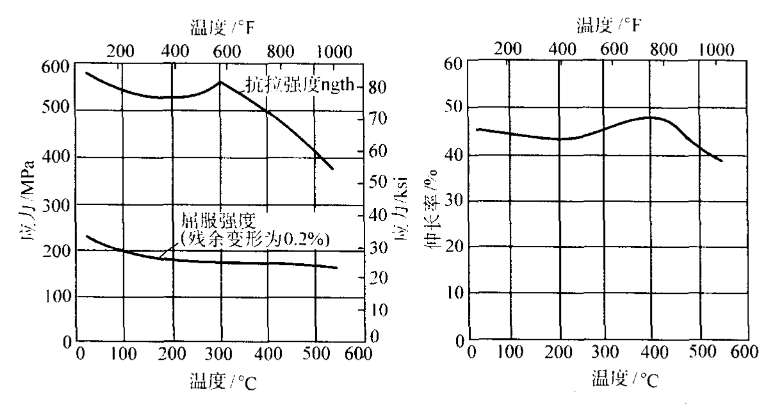


图 5.2-1　Ni66Cu30 合金（退火后）的高温拉伸性能

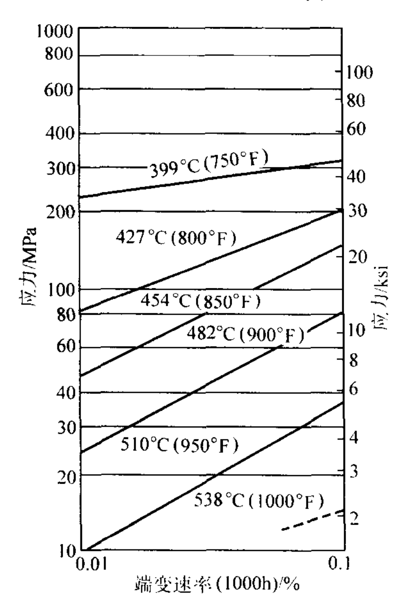


图 5.2-2　Ni66Cu30 合金的蠕变性能
（冷拉 20%后、538℃ 8 h 退火）

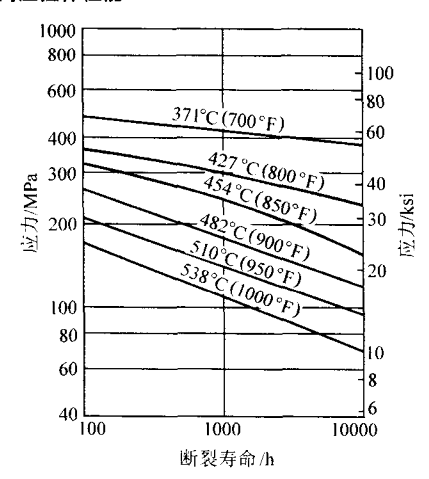


图 5.2-3　Ni66Cu30 合金断裂寿命
（冷拉后 538℃ 8 h 消除应力退火）

2.3.2　Ni70Cu28S 合金的力学性能

Ni70Cu28S 合金典型的拉伸、压缩性能见表 5.2-10。

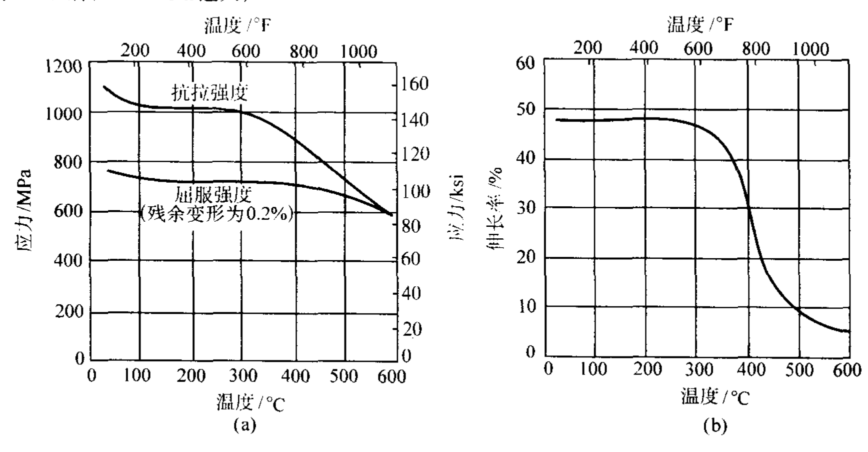


图 5.2-4　Ni70Cu28AlTi 合金的高温拉伸性能

表 5.2-10　Ni70Cu28S 拉伸压缩性能

材料状态	拉伸				压缩	
	σ_b /MPa	$\sigma_{0.01}$ /MPa	$\sigma_{0.02}$ /MPa	伸长率 /%	$\sigma_{0.01}$ /MPa	$\sigma_{0.02}$ /MPa
热轧	524	228	248	39.5	179	234
冷拉消除应力	572	427	510	28.0	352	455
冷拉退火	503	172	193	44.5	159	179

Ni70Cu28S 合金的冲击性能为：热轧态的摆锤式 V 型缺口的冲击吸收功为 254 J，退火态的为 266 J。

此合金在 10^8 次循环下的疲劳强度：热轧态为 248 MPa，冷拉态为 252 MPa，退火态为 207 MPa。

2.3.3　Ni70Cu28AlTi 合金的力学性能

Ni70Cu28AlTi 合金的硬度及拉伸压缩性能见表 5.2-11，

其高温力学性能见图 5.2-4、图 5.2-5 及图 5.2-6。

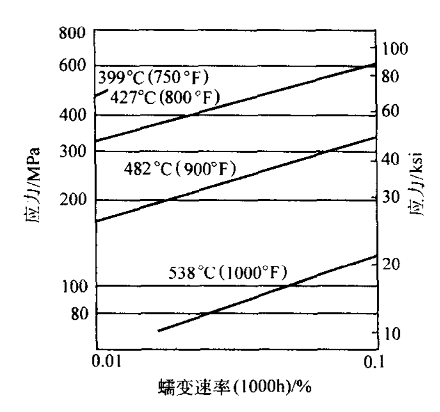


图 5.2-5　Ni70Cu28AlTi 合金的蠕变性能

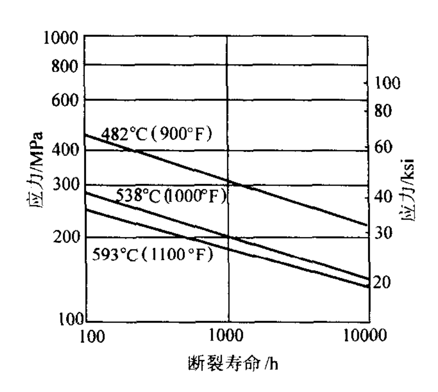


图 5.2-6　Ni70Cu28AlTi 合金的断裂寿命

表 5.2-11　Ni70Cu28AlTi 合金的拉伸压缩性能及硬度

材料状态	拉伸			压缩		硬度 HB
	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ/%	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_{0.1}$ /MPa	
热轧	690	324	42.5	276	234	165
时效硬化	1 041	765	300	834	662	300

合金的冲击性能：时效棒材的摆锤式 V 型缺口试样的冲击吸收功，20℃为 50 J，－196℃为 42 J。

合金的疲劳强度：循环次数为 10^8 时，退火态为 262 MPa，热轧态为296 MPa，热轧加时效态为 352 MPa。

2.3.4　Ni70Cu28Al 合金的力学性能

Ni70Cu28Al 合金的拉伸性能见表 5.2-12。

2.3.5　NCu28－2.5－1.5 合金的力学性能

NCu28－2.5－1.5 合金的力学性能如表 5.2-13。

2.4　镍铜系耐蚀合金的耐蚀性能

镍铜系耐蚀合金的几个牌号的耐蚀性基本相近，只是含有 Al、Ti 的两个牌号在时效状态下耐蚀性有些不同，在某些环境下对应力腐蚀裂纹更为敏感。

镍铜系合金在还原性介质中的耐蚀性优于纯镍，而在氧化性介质中的耐蚀性优于纯铜。它们在氢氟酸和氟气中具有优异的耐蚀性，在所有的强碱中也是高度耐蚀的；在非氧化性的无机酸和大多数有机酸中有相当的耐蚀能力；在工业大气、天然水和流动的海水、氯化物溶液、玻璃腐蚀介质中也有良好的耐蚀性。例如 Ni66Cu30 合金在压力为 7 MPa、温度为 198℃的高温水中腐蚀速率为 0.002 mm/a；在流动的海水中腐蚀速率为 0.025 mm/a；在 65℃ 的氢氟酸中小于 0.3 mm/a；在 135℃的 75%氢氧化钠溶液中小于 0.015 mm/a。此合金在静止或流速很慢的海水中易遭受点蚀，在硝酸、铬酸、湿氯气和次氯酸盐溶液中不耐蚀。它在硫酸、盐酸中不同温度下的腐蚀速率分别如图 5.2-7 和图 5.2-8。

表 5.2-12　Ni70Cu28Al 合金的拉伸性能及硬度

材料状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	硬　度
热轧	586	255	47	74HRB
退火	572	234	48	73HRB
退火并时效	986	655	27	24HRC

表 5.2-13　NCu28-2.5-1.5 合金的力学性能

试验温度/℃	室温	150	200	260	427	483	538	－10	－40	－80	－120
σ_b/MPa	575	529	526	530	547	423	371	530	549	588	628
$\sigma_{0.2}$/MPa	223	187	178	176	178	129	159	177	177	186	196
伸长率 δ/%	45	43	42	44	47	42	41	46	47	40	41

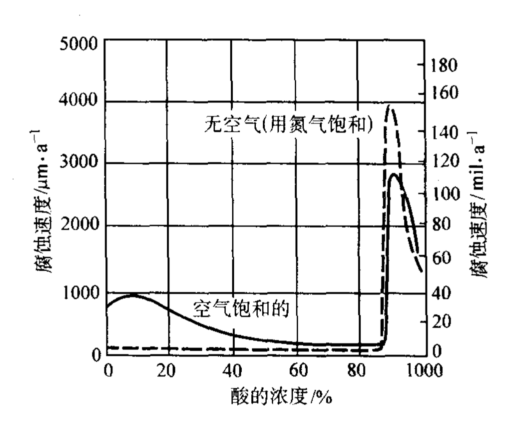


图 5.2-7　Ni66Cu30 合金在硫酸中 66℃下的腐蚀速度

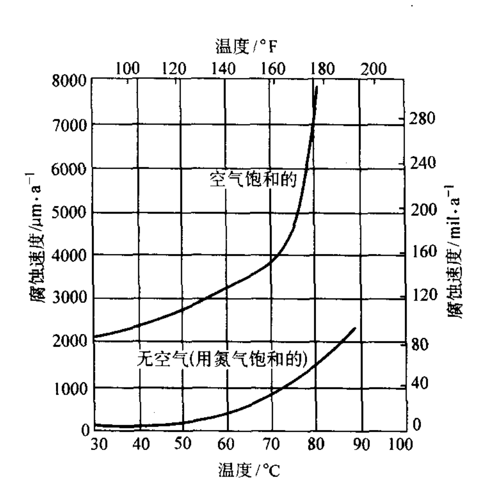


图 5.2-8　Ni66Cu30 合金在 5%的盐酸中温度对腐蚀速度的影响

NCu28-2.5-1.5合金在某些无机酸、有机酸及一些盐溶液中的腐蚀情况如表5.2-14～表5.2-16。

表5.2-14 NCu28-2.5-1.5合金在各种介质中的腐蚀情况

介质	浓度/%	温度/℃	腐蚀等级	介质	浓度/%	温度/℃	腐蚀等级
硫酸	6 10 20 50	101 102 104 123	C C D E	醋酸 酒石酸	50 5 50 50	20 沸 沸 20	D B C B
盐酸	10 0.5 1.0	30 沸 沸	E D E	草酸 柠檬酸 蚁酸	30 30 30	20 20～100 20	B B C
磷酸	10 25 85 90	60 95 95 105	D C C C	番茄汁 柠檬汁 葡萄汁 脂肪酸	— — — —	20 20～100 20～100 20～100	A B C C
氢氟酸	6 25	76 30	B B	四氯化碳 三氯甲烷	— —	30 30	B A
醋酸	50 100	80 50	B B	二氯乙烯 三氯乙烯	— —	30 30	A B
氯化钠	饱和	95	C	氯化铵	30～40	102	D
氯化钙	35	70～160	B	氯化镁	42	135	B
硝酸钠	27	50	B	氯化锌	10～20	38	D

表5.2-15 Ni66Cu30合金在氢氟酸中的腐蚀情况

浓度/%	温度/℃	充空气	试验时间/h	试验条件	腐蚀等级
10	16	无	720	—	A
10	21	轻微	—	敞口	D
25	80	饱和	48	—	D
30	21	轻微	—	敞口	D
30	21	无	96	—	C
35	120	无	144	充氮气	B
35	120	饱和	48	通空气	E
48	65	充气	312	有空气	D
48	115	无	192	密闭瓶中	B
40～60	21	—	792	贮罐中	C
70	21	无	192	密闭瓶中	B
70	115	无	192	密闭瓶中	D
90	21	无	24	—	B
98	21	无	192	密闭瓶中	B
98	115	无	192	密闭瓶中	B
100	21	无	840	—	A
100	21	轻微	24	敞口	D
100	143	无	192	密闭瓶中	B

表5.2-16 Ni66Cu30合金在氟硅酸中的腐蚀情况

介质组成/%		试验温度/℃	试验时间/h	腐蚀等级
氟硅酸	氢氟酸			
10	0	24	96	C
10	30	24	96	C
20	0	24	96	C
20	30	24	96	C
30	0	24	96	B
35.2	0	24	96	B
22	0	80	96	C
22	2	80	96	C

Ni66Cu28合金在氢氟酸、硫酸、盐酸、氟气，HF及HCl气中的腐蚀情况见表5.2-17、表5.2-18以及图5.2-9～图5.2-15。

表5.2-17 NCu28-2.5-1.5合金在工厂条件下的几种浓度的氢氟酸中的腐蚀性能

介质浓度与组成	温度	腐蚀速度/mm·a⁻¹
40%～60%HF	室温	0.078
工厂生产的60%～65%HF（含氟硅酸1.5%～2.5%，$H_2SO_4$0.3%～1.25%，Fe0.01%～0.03%）	室温	0.559
12%HF+0.2%氟硅酸+1 mol/L Fe^{+3}流速5 m/s	室温	0.305

表5.2-18 NCu28-2.5-1.5合金在高温氟气中的腐蚀性能

试验温度/℃	增重腐蚀率/g·(m²·h⁻¹)				晶间腐蚀情况		表面腐蚀情况
	试验时间/h				试验时间/h		
	24	48	72	96	96	400	
400	0.042	0.030	0.044	0.034	无	有晶间腐蚀	表面有金属光泽
500	0.143	0.086	0.060	0.048	无	有晶间腐蚀	表面呈灰色膜
550	0.177	0.106	0.085	0.075	无	有晶间腐蚀	表面呈灰色膜
620	1.090	0.760	0.064	0.544	无	有晶间腐蚀	表面膜开始脱落

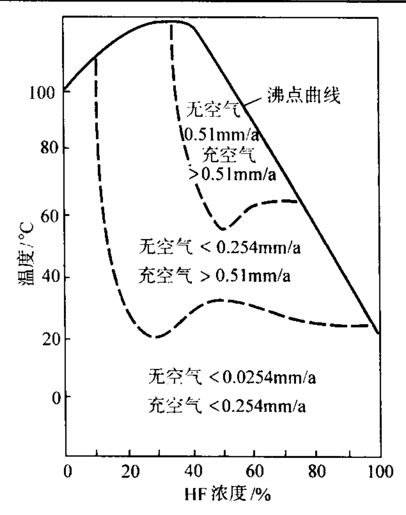


图5.2-9 NCu28-2.5-1.5合金在HF中的等腐蚀图

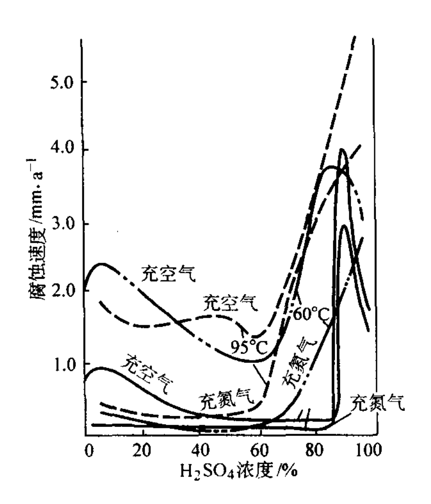


图 5.2-10 NCu28-2.5-1.5 合金在 H_2SO_4 中的等腐蚀图

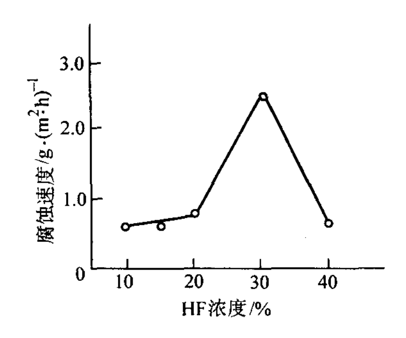


图 5.2-11 NCu28-2.5-1.5 在不同浓度沸腾氢氟酸中的耐蚀性

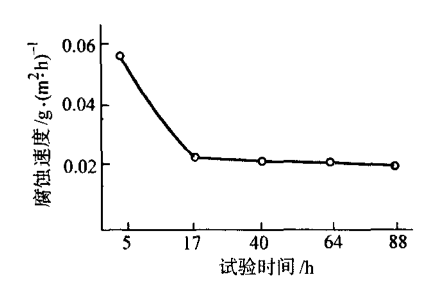


图 5.2-12 Ni70Cu28 合金在 200℃氟气中的耐蚀性

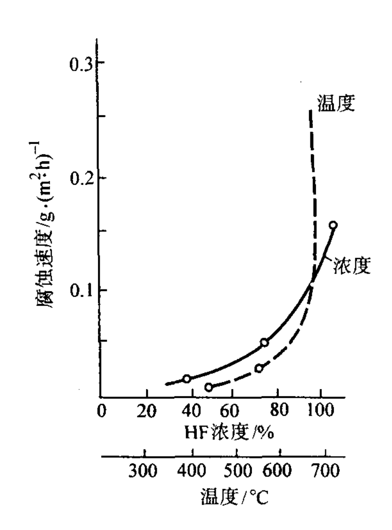


图 5.2-13 HF 的浓度、温度对 NCu28-2.5-1.5 合金耐蚀性的影响

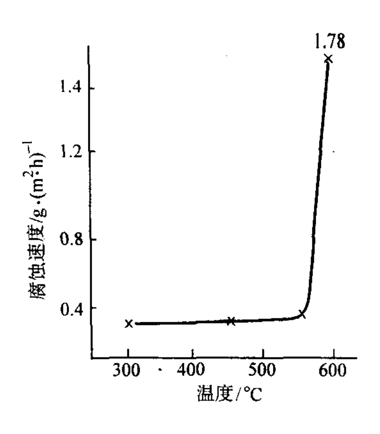


图 5.2-14 NCu28-2.5-1.5 合金在 HCl 气中的耐蚀性

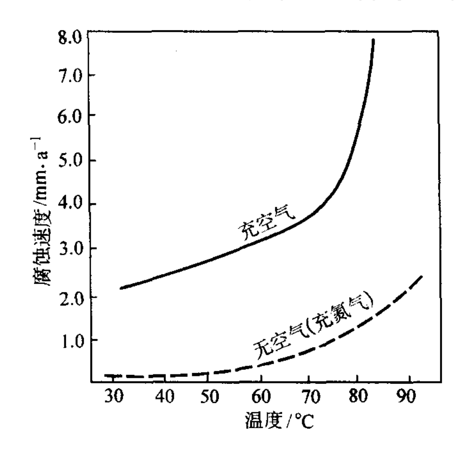


图 5.2-15 在 5%HCl 中，温度对 NCu28-2.5-1.5 合金耐蚀性的影响

2.5 镍铜系耐蚀合金的工艺性能及加工热处理工艺

表 5.2-1 所列五个牌号的镍铜系耐蚀合金都属变形合金，都具有良好的冷热加工性能。其热加工及热处理工艺见表 5.2-19。

表 5.2-19 镍铜系耐蚀合金的热加工及热处理工艺

合金材料	退火温度/℃	热加工温度/℃	固溶温度/℃	时效工艺
Ni66Cu30	760～930	650～1 180	—	—
Ni70Cu28S	760～980	650～1 150	—	—
Ni70Cu28AlTi	870～980	870～1 150	冷精整产品 1 040℃水淬 其他 980℃水淬	620℃2 h，炉冷至 565℃4 h，炉冷至 510℃4 h，空冷
Ni70Cu28Al	760～870	925～1 150	730～760 水淬	620℃2 h，炉冷至 565℃4 h，炉冷至 510℃4 h，空冷
Ni70Cu28	870～980（软化退火） 540～650（消除应力退火）	650～1 180	—	—

焊接性能：

镍铜系耐蚀合金可以用相匹配的焊丝或焊条进行焊接。用钨电极氩弧焊时可用 Monel 焊丝 60；用手工电弧焊可

用Monel焊条190；埋弧焊可用Monel焊丝60和Incoflu×5埋弧焊剂；当与碳钢或低合金钢焊接时，用Monel焊条190；用氧乙炔焊时，要采用与母材相匹配的焊丝。

2.6 镍铜系铸造耐蚀合金

上述镍铜系合金都是形变合金，铸造镍铜耐蚀合金也有广泛的应用。铸造合金的成分除了硅含量普遍比变形合金高之外，微量元素也有些变化。镍铜系铸造合金的成分见表5.2-20。

表5.2-20 镍铜系铸造耐蚀合金的化学成分

合金牌号	成分（质量分数）/% ≤						
	C	Si	Mn	Fe	Cu	Ni	其他
M-35-1	0.35	1.25	1.5	3.5	26~33	余	
M-35-2	0.35	2.0	1.5	3.5	26~33	余	
QQ-N-288							
A级	0.35	2.0	1.5	2.5	26~33	62~68	
B级	0.30	2.7~3.7	1.5	2.5	27~33	61~68	
C级	0.20	3.3~4.3	1.5	2.5	27~31	>60	
D级	0.25	3.5~4.5	1.5	2.5	27~31	>60	
E级	0.30	1.0~2.0	1.5	3.5	20~33	>60	1~3（Nb+Ta）

硅含量较低的几个牌号（M-35-1，M-35-2及QQ-N-288E级），通常与形变镍铜合金一同用于泵、阀门等配件。硅含量较高的合金，用于旋转零件和摩擦环，这种合金既有良好的耐蚀性，还兼有高强度和耐磨性。含硅达4.0%的合金可用于要求抗咬合能力极好的环境。

M-35-1、M-35-2、QQ-N-288A、E等合金可在铸造状态下使用，但在815~925℃进行均匀化处理后，可提高其耐蚀性能。在多数耐腐蚀条件下，铸造状态合金的枝晶偏析对耐蚀性影响不大。

由于Si在Ni-Cu合金中的溶解度小于在纯镍和纯铜中的溶解度，当硅含量大于3.5%时，合金中将析出$(NiCu)_3Si$化合物，合金可以进行时效强化处理，处理工艺为：900℃固溶处理（保温时间根据铸件截面厚度，每25 mm厚保温1 h)，油淬。当铸件形状复杂，截面厚度变化大，油淬易导致开裂，此时固溶处理需先预热到300~350℃，然后再加热至900℃保温，冷却时由900℃炉中转移至730℃炉中均热后，再在油中淬火。

时效工艺：铸件在315℃装炉，升温至600℃保温4~6 h空冷。

铸造镍铜系耐蚀合金的力学性能如表5.2-21。

表5.2-21 铸造镍铜系耐蚀合金的力学性能

合金牌号	σ_b /MPa ≥	σ_s /MPa ≥	伸长率δ /%	HB
M-35-1	345	124	10	
M-35-2	448	127	25	110~140
QQ-N-288				
A级	448	207	25	125~150
B级	689	455	10	240~290
C级	825	550	10	250~300
D级	—	—	—	300
E级	448	221	25	120~150

表中QQ-N-288D级合金，由于硅含量高，硅化物数量多，合金强度高，延性急剧降低，表中惟一列入技术条件的性能是最低硬度值，合金在固溶处理后硬度最低。

合金随硅含量增加韧性减小，但保持韧性的最低温度为-195℃。

合金的可焊性随硅含量的增加而降低，硅含量为1.5%时仍然可焊，铌能提高合金的可焊性。高硅成分的合金是不能熔焊的，但可以采用软钎焊或硬钎焊焊接。

2.7 镍铜系耐蚀合金的典型应用举例

镍铜系耐蚀合金广泛应用于化学、化工、石油、冶金、海洋工程、船舶、环保等多种领域。Ni66Cu30合金（Monel 400）通常用于阀门和泵的零件、螺旋桨轴、船舶上的固定装置和固紧件、化工及石油加工设备、锅炉给水加热器及其他热交换器。

Ni70Cu28S合金（Monel R 405）是Ni66Cu30合金易切削的变型，用于自动机床生产的零件螺钉、水表零件、阀座衬垫、原子能设备的固紧零件。

Ni70Cu28AlTi合金（Monel K-500）是一种可时效硬化的合金，它用于耐腐蚀性与Ni66Cu30合金相当、同时要求具有较高强度的场合，例如泵轴和叶轮、刮浆刀、石油钻井接头、弹簧和调整阀门等。

Ni70Cu28Al合金（Monel K 502）是Ni70Cu28AlTi合金的改型，它具有更好的机加工性能，主要用于紧固件、泵、螺旋桨和阀杆等。

3 镍铬系耐蚀合金

3.1 镍铬系耐蚀合金的牌号与成分

镍铬系合金中由于含有较高的铬（含铬一般在15%以上，最高可达50%），合金在高温下具有较高的强度和抗氧化能力，同时加入Al、Ti、Nb等元素后，合金则可以时效强化，其主要强化相为γ′和γ″相。

美、俄镍铬系耐蚀合金的牌号与成分见表5.2-22。

表5.2-22 美、俄镍铬系耐蚀合金的牌号与成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%								对应商品名称
	Ni	Cr	Fe	Si	Mn	C	Cu	其他	
0Cr35Ni60	62	35	≤2.0	≤0.6	≤1.0	≤0.08	—		Corronel 230
0Cr50Ni50	余	48	—	—	—	≤0.05	—	0.35Ti	Inconel 671
00Cr40Ni55Al	余	39~41	≤0.6	≤0.1	≤0.1	≤0.03	—	3.3~3.8Al	ЭП795
1Cr15Ni75Fe	≥72	14~17	6~10	≤0.5	≤1.0	≤0.15	≤0.05	—	Inconel 600
0Cr30Ni60Fe10	≥58	27~31	7~11	≤0.5	≤0.5	≤0.05	≤0.5		Inconel 690
1Cr15Ni70TiAlNb	≥70	14~17	5~9	≤0.5	≤1.0	≤0.08	≤0.05	0.7~1.2Nb 2.25~2.75Ti 0.4~1.0Al	Inconel X-750

根据我国GB/T 15009—1994规定的镍铬系耐蚀合金的牌号与化学成分见表5.2-23。

3.2 镍铬系耐蚀合金的物理性能

典型的镍铬系耐蚀合金的物理性能见表5.2-24。

表 5.2-23 镍铬系耐蚀合金的牌号及化学成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%											
	Ni	Cr	Fe	Cu	Al	Ti	C	Si	Mn	P	S	其他
NS311	余量	28.0 ~ 31.0	≤ 1.0	—	≤ 0.30	—	≤ 0.06	≤ 0.50	≤ 1.20	≤ 0.02	≤ 0.020	
NS312	余量	14.0 ~ 17.0	6.0 ~ 10.0	≤ 0.05	—	—	≤ 0.15	≤ 0.50	≤ 1.00	≤ 0.03	≤ 0.015	
NS313	余量	21.0 ~ 25.0	10.0 ~ 15.0	≤ 1.00	1.00 ~ 1.70	—	≤ 0.10	≤ 0.50	≤ 1.00	≤ 0.03	0.015	
NS314	余量	35.0 ~ 38.0	≤ 1.0	—	0.20 ~ 050	—	≤ 0.03	≤ 0.50	≤ 1.00	≤ 0.03	0.020	
NS411	余量	19.0 ~ 21.0	5.0 ~ 9.0	—	0.40 ~ 1.00	2.25 ~ 2.75	≤ 0.05	≤ 0.80	≤ 1.00	≤ 0.30	0.030	Nb 0.70 ~ 1.20

表 5.2-24 几个典型的镍铬耐蚀合金的物理性能

合金	密度 /g·cm⁻³	固相线温度/℃	液相线温度/℃	线胀系数 /10^{-6} K^{-1}	热导率 /W·(m·K)⁻¹	电阻率 /μΩ·m
0Cr50Ni50	7.86	1 305	1 350	11.8 (26 ~ 93℃)	—	0.869 (21℃)
1Cr15Ni75Fe	8.42	1 355	1 415	—	14.8	1.030 (21℃)
0Cr30Ni60Fe10	8.14	1 345	1 375	15.3 (21 ~ 316℃)	18.8 (316℃)	—
1Cr15Ni70TiAlNb	8.25	—	1 425	—	12.0	1.215

3.3 镍铬系耐蚀合金的力学性能

镍铬系耐蚀合金分为固溶强化型和时效强化型两类，如应用广泛的 1Cr15Ni75Fe（Inconel 600）合金为单相固溶体，另有少量碳化物；另一类如 1Cr15Ni70AlTiNb（Inconel X－750）合金为时效强化型，除含有少量 TiC 等化合物外，主要强化相为 γ' 和 γ''相，合金经淬火时效处理后，抗拉强度可达 1 200 MPa 以上。镍铬系耐蚀合金在不同状态下的力学性能见表 5.2-25，表 5.2-26，表 5.2-27；合金的加工热处理制度见表 5.2-28，表 5.2-29。

表 5.2-25 1Cr15Ni75Fe（Inconel 600）合金的力学性能

状态		抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%
热轧板	轧制态	≥585	≥240	≥30
	退火态	≥550	≥240	≥30
冷轧带	硬 态	≥860	≥620	≥2.0
	退火态	≥550	≥240	≥30
热轧管	退火态	≥550	≥205	≥35
冷轧管	退火态	≥550	≥240	≥35
冷拉棒	硬 态	≥825	≥620	≥7
	退火态	≥550	≥240	≥30
热轧棒		≥655	≥310	≥20

表 5.2-26 1Cr15Ni70TiAlNb（Inconel X－750）合金的力学性能

热处理状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	断面收缩率 ψ/%	硬度 HB
1 149℃固溶处理＋843℃稳定化＋704℃时效	≥965	≥620	≥8	—	≥262
982℃固溶处理＋双级时效	≥1170	≥790	≥18	≥18	302 ~ 363
1 093℃固溶处理＋704℃时效	1 103 ~ 1 276	≥689 ~ 896	≥20	≥20	267 ~ 363

表 5.2-27 0Cr30Ni60Fe10（Inconel 690）的力学性能

材料状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	硬度 HRB
管材，退火	731	365	41	97
带材，退火	758	672	40	88
棒材，轧制态	765	434	40	90
棒材，退火	710	317	49	90
中厚板，轧制态	765	483	36	95

表 5.2-28 镍铬合金的加工热处理制度

热处理制度	1Cr15Ni75Fe (Inconel 600)	0Cr30Ni60Fe10 (Inconel 690)	0Cr50Ni50 (Inconel 671)
退火温度/℃	1 010	980 ~ 1 040	1 200
热加工温度/℃	870 ~ 1 230	1 040 ~ 1 230	—

表 5.2-29 1Cr15Ni70TiAlNb（Inconel X－750）合金的热处理制度

固溶处理	稳定化处理	时效处理
1 149℃ ± 14℃，2 ~ 4 h，空冷	843℃ ± 14℃，24 h，空冷	704℃ ± 14℃，24 h，空冷或炉冷
982℃ ± 14℃，≥1/2h，空冷或水冷		732℃ ± 14℃，8 h，炉冷至 621℃ ± 14℃，18 h，空冷
1 079℃ ~ 1 121℃，1 ~ 2 h，空冷		704℃ ± 14℃，20 h，空冷

镍铬耐蚀合金的高温力学性能（高温短时拉伸）见图 5.2-16，图 5.2-17，图 5.2-18。

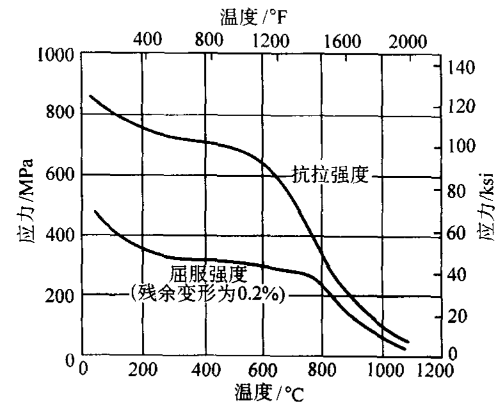


图 5.2-16 0Cr50Ni50（Inconel 671）合金的高温拉伸性能（退火）

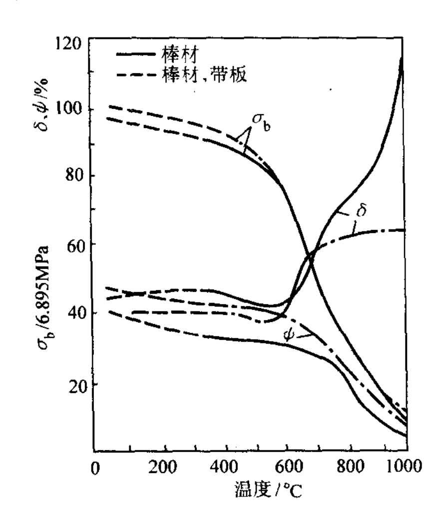


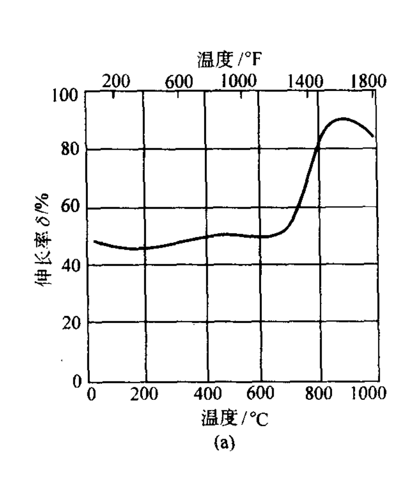
图 5.2-17　1Cr15Ni75Fe（Inconel 600）合金的高温拉伸性能

3.4　镍铬耐蚀合金的耐腐蚀性能

镍铬系耐蚀合金对工业大气、天然水、海水等有良好的耐蚀性，由于合金中含有较多的铬，合金对氧化性酸如硝酸、铬酸、含氧化性盐的酸性溶液都耐蚀，对高分子脂肪酸也耐蚀。对草酸、醋酸等低分子有机酸的耐蚀性略差，尤其是在高温下。这类合金在氯化物溶液中易发生点腐蚀和缝隙腐蚀。镍铬系合金的另一特性是耐强碱溶液的腐蚀。

0Cr50Ni50（Inconel 671）合金，是针对极强的腐蚀环境而设计的，特别是在高温条件下它仍有良好的耐蚀性，对于含有硫和钒的特殊气氛也具有耐蚀性。表 5.2-30 为该合金在硫酸钠和五氧化二钒混合溶液中的腐蚀速率。

1Cr15Ni75Fe（Inconel 600）合金在氧化性和还原性酸性溶液中都具有良好的耐蚀性，它在硫酸和氢氟酸中的腐蚀速率见表 5.2-31 和图 5.2-19。它对稀盐酸耐蚀，但在浓度大或热盐酸中不耐蚀。图 5.2-20 是合金在沸腾氢氧化钠溶液中的腐蚀速率。



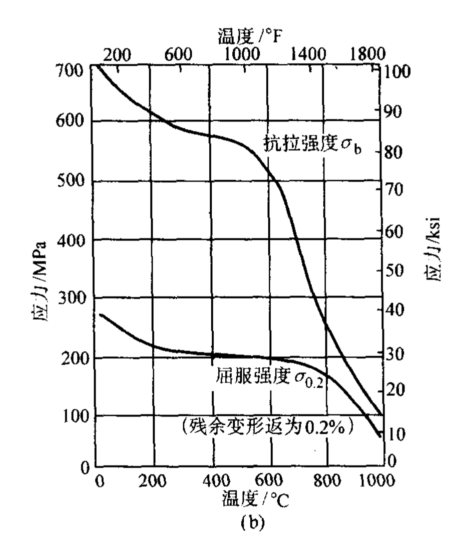


图 5.2-18　0Cr30Ni60Fe10（Inconel 690）合金的高温拉伸性能

表 5.2-30　0Cr50Ni50 合金在 Na_2SO_4 和 V_2O_5 混合溶液中的腐蚀速率

混合溶液的浓度	腐蚀时间/h	质量损失/$g\cdot m^{-2}$
80% V_2O_5，20% Na_2SO_4	16	9.72
	150	61.36
	300	76.78
20% V_2O_5，80% Na_2SO_4	16	9.0
	150	63.3
	300	182.1

表 5.2-31　1Cr15Ni75Fe 合金在各种浓度 H_2SO_4 中的腐蚀速率

H_2SO_4 浓度/%	腐蚀速率/$mm\cdot a^{-1}$	
	室温	沸腾温度
10	0.081	3.43
20	0.051	4.72
30	0.064	5.49
40	0.046	17.8
50	0.041	—
60	0.048	—
70	0.058	—
80	0.566	—

续表 5.2-31

H_2SO_4 浓度/%	腐蚀速率/$mm\cdot a^{-1}$	
	室温	沸腾温度
90	0.013	—
98	0.188	—

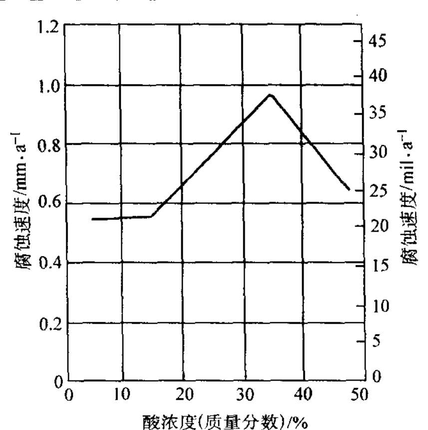


图 5.2-19　1Cr15Ni75Fe 合金在 75℃ 氢氟酸中的腐蚀速率

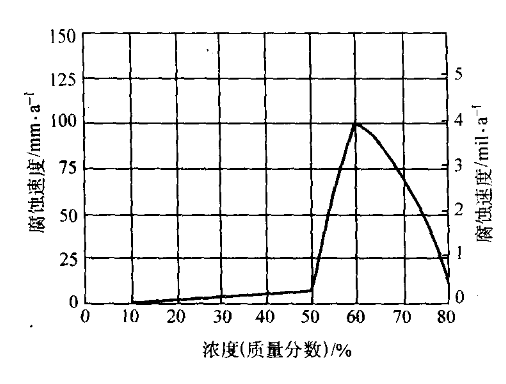


图 5.2-20　1Cr15Ni75Fe 合金在沸腾 NaOH 溶液中的腐蚀速率

0Cr30Ni60Fe10（Inconel 690）合金对氧化性介质和高温下的含硫气体有良好的耐蚀性，表 5.2-32 为该合金在硝酸和氢氟酸混合溶液中的腐蚀速率。

表 5.2-32　0Cr30Ni60Fe10 合金在 HNO_3 和 HF 混合溶液中的腐蚀速率

混合酸浓度	腐蚀速率/$mm\cdot a^{-1}$
10% HNO_3，3%HF	0.15
15% HNO_3，3%HF	0.25
20% HNO_3，3%HF	0.15

3.5　铸造镍铬耐蚀合金

目前我国尚无铸造镍铬耐蚀合金的标准与牌号。美国有一个牌号为 CY－40，其成分与对应的形变合金相比略有不同，它含有较高的碳、锰、硅，以保证合金的铸造性能和压力密封性能。其成分为：Cr 14%～17%，Fe 10%，C 0.4%，Si 3%，Mn 1.5%，余为 Ni。其室温力学性能为：σ_b = 483 MPa，$\sigma_{0.2}$ = 193 MPa，δ = 30%。合金对晶间腐蚀不敏感。

CY-40 合金也可用于高温，其高温力学性能见表 5.2-33。

表 5.2-33　CY-40 合金的高温力学性能

温度/℃	短时强度/MPa	持久强度（100 h）/MPa
480	427	
650	372	165
730	314	103
815	186	62
925		33

CY-40 合金可以采用弧焊焊接，一般情况焊后不需进行热处理，必要时可进行消除应力退火。

此外，我国于 20 世纪 70 年代研制了 NiCr28CuCe、NiCr28SiCe 两个镍铬系耐蚀铸造合金，用于制造连续玻璃纤维生产的拉丝漏板，曾在中小型玻璃纤维厂推广应用。合金在 1 150℃以下，耐融熔玻璃腐蚀性良好，也可用于较高温度下各种浓度的氢氟酸、高温氟气以及硝酸中的耐蚀部件。合金可以在铸态下使用，也可以热加工成板材、棒材。可以焊接。

4　镍钼系耐蚀合金

盐酸是腐蚀性很强的无机酸之一，为了提高金属材料对盐酸的抗蚀性能，研究了在镍合金中加入钼的作用，结果表明，钼能显著提高耐盐酸腐蚀能力，从而发展了镍钼系耐蚀合金。含钼 28%的镍钼合金在常压下能耐任何温度下盐酸的腐蚀。

镍钼系合金存在晶间腐蚀敏感性。这是由于合金在高温下（≥1 200℃），将有 M_6C、M_2C 等碳化物以及含 Mo 的 σ 相沿晶界析出，在 580～900℃则有 Ni_4Mo 和 Ni_3Mo 等金属间化合物在晶界析出，这都会造成晶界附近的贫钼，从而导致晶间腐蚀。因此尽量降低合金中的碳、铁、硅含量，或加入稳定碳化物元素钒，都可以改善晶间腐蚀的敏感性。但是这类合金仍然要避免在 550～850℃温度范围内长期使用。

镍钼系耐蚀合金俗称哈氏合金，即美国 Hastelloy 系列合金中的几种。

4.1　镍钼系耐蚀合金的牌号与化学成分

美、俄镍钼系耐蚀合金的成分与牌号见表 5.2-34。

表 5.2-34　美、俄镍钼系耐蚀合金的牌号与化学成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%								对应商品名称
	Ni	Mo	Fe	Cr	C	Si	Mn	其他	
Ni65Mo28FeV	余	26～30	4～6	≤1.0	≤0.05	≤1.0	≤1.0	0.2～0.4 V	Hastelloy B
0Ni70Mo28	余	26～30	≤2.0	≤1.0	≤0.02	≤0.1	≤1.0	—	Hastelloy B－2
Ni70MoV	余	25～27	≤0.5	—	≤0.02	≤0.1	≤0.5	1.4～1.7 V，0.1～0.45 W	ЭП814

我国 GB/T 15009—1994 规定的 NS321，NS322 以及 JB/T 5329.2—1991 规定的耐盐酸腐蚀的弹性合金基本与上述合金对应。其具体成分见表 5.2-35。

表 5.2-35　我国镍钼系耐蚀合金牌号与成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%								标准号
	Ni	Mo	Cr	Fe	V	C	Si	Mn	
NS321	余量	26～30	≤1.0	4.0～6.0	0.20～0.40	≤0.05	≤1.0	≤1.0	GB/T 15009—1994
NS322	余量	26～30	≤1.0	≤2.0	—	0.020	≤1.0	≤1.0	GB/T 15009—1994
Ni70Mo28V	余量	28～30	—	≤1.0	0.3～0.5	≤0.02	≤0.3	0.4～0.8	JB/T 5329.2—1991

4.2　镍钼系耐蚀合金的物理性能与力学性能

镍钼系耐蚀合金的物理性能见表 5.2-36 和表 5.2-37。

表 5.2-36　镍钼耐蚀合金的物理性能

合金牌号	熔点/℃	密度/$g\cdot cm^{-3}$	电阻率/$\mu\Omega\cdot m$	比热容/$J\cdot(kg\cdot K)^{-1}$	热导率/$W\cdot(m\cdot K)^{-1}$	磁化率
NS321	1370	9.24	135	380	12.2	1.001
NS322	—	9.22	137	373	13.4	—

表 5.2-37　镍钼耐蚀合金的线胀系数　$10^{-6}K^{-1}$

合金牌号	温度/℃					
	93	204	316	427	538	1 000
NS321①	10.0	—	—	—	—	14.6
NS322②	10.3	10.8	11.2	11.5	11.7	—

① 起始温度为 0℃；
② 起始温度为 20℃。

镍钼系合金的力学性能见表5.2-38，表5.2-39。

表5.2-38 NS321、NS322合金的力学性能

合金牌号	状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	硬度 HRB
NS321	板，退火态	≥690	≥310	≥40	≤100
	带，退火态	≥795	≥345	≥45	≤100
	棒，退火态	≥795	≥315	≥45	—
NS322	退火态	≥758	≥352	≥40	≥100

表5.2-39 Ni70Mo28V合金的力学性能（≥）

状态	弹性模量 E/GPa	抗弯强度 σ_{be}/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%	维氏硬度 HV	杯突值 /mm
1 100～1 180℃快冷固溶	195	550	900	47	220	10
50%冷加工	195	680	1 300	3	400	—
11%～14%冷加工	195	310	1 000	20	300	—

4.3 镍钼系耐蚀合金的抗腐蚀性能

由于钼对各种浓度的盐酸、磷酸、氢氟酸等非氧化性溶液都具有良好的耐蚀性。镍合金中添加钼与镍形成固溶体，就显著提高了镍合金对这些溶液的耐蚀性，而且随着钼含量的增加，耐蚀性也增加，当钼含量超过25%以后的镍钼合金是能够在各种温度下耐各种浓度盐酸腐蚀的少数几种金属材料之一。图5.2-21为0Ni70Mo28（NS321）合金在盐酸中的等腐蚀图。镍钼合金还耐硫酸、醋酸、磷酸、甲酸以及氯化氢气体的腐蚀。表5.2-40是镍钼合金在几种沸腾酸溶液中的腐蚀速率。图5.2-22为0Ni70Mo28合金在硫酸中的等腐蚀图。

但是，当酸溶液中含有氧或氧化剂以及 Cl^- 时，合金的耐蚀性显著降低。图5.2-21中的虚线是盐酸中含有氧时的等腐蚀线，图5.2-22中的虚线是硫酸中含有 Cl^- 时的等腐蚀线。另外，当酸溶液中含有 Fe^{3+}、Cu^{2+} 等氧化性离子时，合金的耐蚀性也降低。图5.2-23为盐酸、硫酸中所含 Fe^{3+} 浓度对腐蚀速率的影响。

因此，镍钼合金不宜在含有氧或氧化剂的酸溶液中使用。如果镍钼合金在使用时，部件需要和钢铁、铜等金属连接，造成 Fe^{3+}、Cu^{2+} 等离子进入酸中，也会降低耐蚀性，不宜选用。

表5.2-40 镍钼合金在几种沸腾酸溶液中的腐蚀速度 mm·a⁻¹

合金牌号	醋酸浓度/%				磷酸浓度/%				甲酸浓度/%				
	10	30	50	70	10	30	50	85	10	20	30	40	60
Ni70Mo28	<0.02	0.01	0.01	<0.01	0.05	0.08	0.15	0.63	<0.01	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Ni65Mo28FeV	—	—	—	—	0.025	0.076	0.076	0.71	—	—	—	—	—

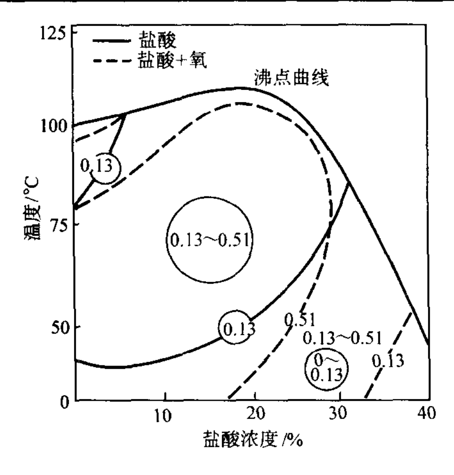


图5.2-21 0Ni70Mo28合金在盐酸中的等腐蚀图（mm/a）

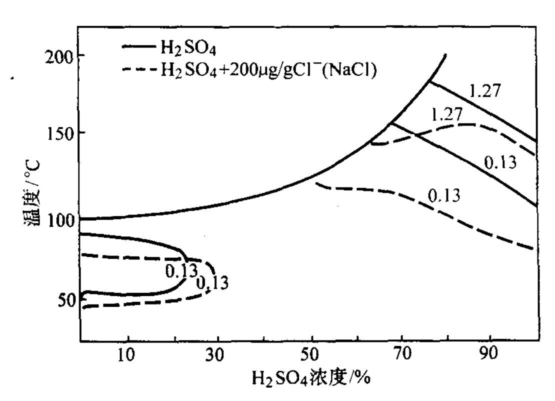


图5.2-22 0Ni70Mo28合金在硫酸中的等腐蚀图（mm/a）

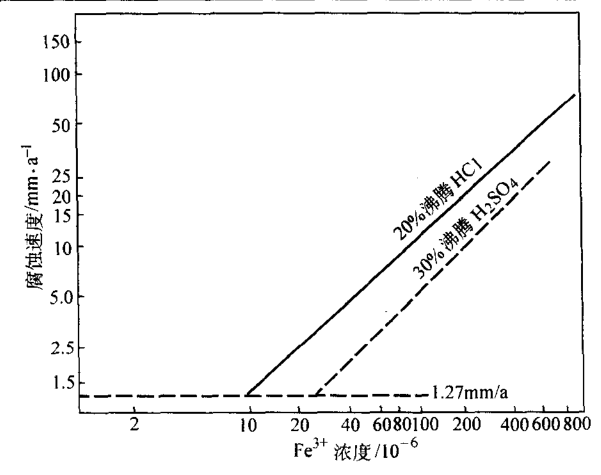


图5.2-23 酸中 Fe^{3+} 浓度对0Ni70Mo28合金在盐酸、硫酸中腐蚀速度的影响

4.4 镍钼系耐蚀合金的工艺性能

镍钼合金可以冷、热加工，热加工温度为1 180～1 230℃，热变形率可达25%～40%。镍钼合金的加工硬化率大于Ni-Cr奥氏体不锈钢，其中间退火温度约为1 150～1 200℃。合金的冷变形程度对其耐蚀性没有太大的影响。

镍钼合金有良好的焊接性能，可以用各种常规的焊接方法焊接。例如手工电弧焊、金属极氩弧焊、钨极氩弧焊、电阻焊等，但是用氧-乙炔焊接时，容易引起增碳，降低了耐蚀性，故不宜采用。焊接时可用与基材成分相同的焊丝。

镍钼合金焊接后可以空冷或水冷，但对于要求高的设备或部件，则焊后必须进行固溶处理。另外镍钼合金线胀系数

和热导率都比碳钢低，而电阻率则比碳钢高，所以与碳钢焊接后不宜快冷。当与其他材料焊接时所用焊丝应选两者中电位较正的一种，通常多选用镍钼合金作焊丝。

4.5　铸造镍钼系耐蚀合金

铸造镍钼耐蚀合金我国尚未有标准牌号，美国有两种铸造镍钼合金牌号，成分见表 5.2-41。

表 5.2-41　美国铸造镍钼耐蚀合金的牌号与化学成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%								对应商品名称
	Ni	Mo	Fe	Cr	Si	Mn	C	其他	
N-12M-1	余量	26～30	4～6	1.0	1.0	1.0	0.12	0.2～0.6 V	Hastelloy－B
N-12M-2	余量	30～33	3.0	1.0	1.0	1.0	0.07	－	Chlorimet 2

铸造镍钼耐蚀合金的力学性能见表 5.2-42。

表 5.2-42　铸造镍钼合金的室温力学性能

合金牌号	抗拉强度 σ_b/MPa　≥	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa　≥	伸长率 δ/%　≥
N-12M-1	524	317	6
N-12M-2	524	317	20

铸造镍钼耐蚀合金在铸造时如果慢冷，对合金的耐蚀性、延展性和可焊性都不利。可以采用在 1 180℃固溶处理后，水冷。

合金可以采用弧焊，焊后不需进行热处理。

5　镍铬钼系耐蚀合金

从第 3 节和第 4 节中可知，镍铬系合金在氧化性介质中耐蚀，而镍钼系合金在还原性介质中耐蚀，于是推测，在镍基合金中同时含有较高的铬和钼，将会在氧化性和还原性介质中都有良好的耐蚀性，根据这个思路开发出了镍铬钼系耐蚀合金，也是哈氏（Hastelloy）合金的主体，目前美国有 9 个牌号，我国有 7 个牌号。

5.1　镍铬钼系耐蚀合金的牌号与化学成分

美国标准规定的镍铬钼系耐蚀合金的化学成分见表 5.2-43。

我国 GB/T 15009—1994 规定的镍铬钼耐蚀合金的牌号与成分见表 5.2-44。

5.2　镍铬钼系耐蚀合金的物理性能

镍铬钼系耐蚀合金的主要物理性能见表 5.2-45。

几种镍铬钼耐蚀合金的线胀系数如表 5.2-46。

5.3　镍铬钼系耐蚀合金的力学性能

镍铬钼系耐蚀合金有良好的室温和高温力学性能。合金通常要求经过固溶处理。经固溶处理后的力学性能及固溶处理温度，见表 5.2-47。

表 5.2-43　美国镍铬钼系耐蚀合金的牌号与化学成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%										对应商品名称
	Ni	Cr	Mo	Fe	W	Co	C	Si	Mn	其他	
Ni64Cr16Mo16	余量	14～18	14～17	≤3.00	—	≤2.0	≤0.15	≤0.08	≤1.0	Ti 0.70	Hastelloy C-4
Ni59Cr15Mo16W5Fe5	余量	15.5～16.5	15～17	4.0～7.0	3～4.5	≤2.5	≤0.02	≤0.08	≤1.0	V 0.35	HastelloyC-276
Ni50Cr20Mo7Fe	余量	21～23.5	5.5～7.5	18.0～21.0	≤1.0	≤2.5	≤0.05	≤1.0	1.0～2.0	Ta＋Nb 1.75～2.5	Hastelloy G
Ni48Cr22Mo7Fe	余量	22.2	7.0	19.5	≤1.5	≤5.0	≤0.015	0.4	0.8	Ta＋Nb 0.3	Hastelloy G-3
Ni70Cr7Mo17	余量	6.0～8.0	15.0～18.0	≤5.0	≤0.5	≤2.0	0.04～0.08	≤1.0	≤0.8	Ti＋Al 0.5	HastelloyN
Ni68Cr15Mo15	余量	14.5～17.0	14.0～16.5	≤3.0	—	≤2.0	≤0.02	0.2～0.75	0.3～1.0	Al 0.1～0.5 B，0.015 La，0.01～0.10	Hastelloy S
Ni62Cr5Mo24Fe5	余量	4～6	23～26	4～7	—	≤2.5	≤0.12	≤1.0	≤1.0	V ≤0.60	Hastelloy W
Ni49Cr22Mo9Fe18	余量	20.5～23	8.0～10.0	17.0～20.0	0.2～1.0	0.5～2.5	0.05～0.15	≤1.0	≤1.0	B 0.1	Hastelloy X
Ni60Cr18Mo18	余量	17～20	17～20	≤3.0	—	—	≤0.07	≤1.0	≤1.0	—	Chlorimet 3

表 5.2-44　中国镍铬钼系耐蚀合金的牌号与化学成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%									
	Ni	Cr	Mo	Fe	W	Co	C	Si	Mn	其他
NS331	余量	14.0～17.0	2.0～3.0	≤8.0	—	—	≤0.030	≤0.70	≤1.00	Ti 0.4～0.9
NS332	余量	17.0～19.0	16.0～18.0	≤1.0	—	—	≤0.030	≤0.70	≤1.00	
NS333	余量	14.5～16.5	15.0～17.0	4.0～7.0	3.0～4.5	≤2.5	≤0.080	≤1.00	≤1.00	

续表 5.2-44

合金牌号	化学成分（质量分数）/%									
	Ni	Cr	Mo	Fe	W	Co	C	Si	Mn	其他
NS334	余量	14.5~16.5	15.0~17.0	4.0~7.0	3.0~4.5	≤2.5	≤0.020	≤0.08	≤1.00	
NS335	余量	14.0~18.0	14.0~18.0	≤3.0	—	—	≤0.015	≤0.08	≤1.00	Ti ≤0.70
NS336	余量	20.0~23.0	8.0~10.0	≤5.0	—	—	≤0.10	≤0.50	≤0.50	Al ≤0.40 Ti ≤0.40 Nb 3.15~4.15
NS337	余量	19.0~21.0	15.0~17.0	≤5.0	—	≤0.10	≤0.03	≤0.40	0.50~1.50	

表 5.2-45　镍铬钼系合金的物理性能

合金	熔点 /℃	密度 g·cm⁻³	比热容 /J·(kg·K)⁻¹	热导率 /W·(m·K)⁻¹	电阻率 /μΩ·m	弹性模量 /GPa
Ni60Cr15Mo15W4	1 370	8.87	427	10.2	1.30	205
Ni65Cr16Mo16	—	8.64	—	10.0	1.25	211
Ni70Cr15Mo15	1 380	8.74	398	14.1	1.28	212
Ni70Cr7Mo17	—	8.93	419	11.5	1.20	—
Ni60Cr22Mo9Nb	1 350	8.44	410	—	1.29	208
Ni60Cr15Mo15W4	1 340	8.94	385	11.3	1.30	180

表 5.2-46　几种镍铬钼合金的线胀系数

$10^{-6}K^{-1}$

合金牌号	温度/℃									
	93	204	316	427	538	649	760	871	982	1 093
NS332	10.8	11.9	12.6	13.0	13.3	13.5	14.4	14.9	15.7	—
NS333	11.3	—	—	—	—	—	—	—	15.3	—
NS334	11.2	12.0	12.8	13.2	13.4	14.1	14.9	15.0	—	—
NS335	11.5	12.2	12.8	13.1	13.3	13.7	14.4	14.9	15.5	16.0

表 5.2-47　镍铬钼系耐蚀合金的力学性能

合金牌号	推荐的固溶处理温度 /℃	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%
NS331	1 050~1 100	540	195	35
NS332	1 160~1 210	735	295	30
NS333	1 160~1 210	690	315	30
NS334	1 150~1 200	690	285	40
NS335	1 050~1 100	690	275	40
NS336	1 110~1 150	690	275	30

5.4　镍铬钼系耐蚀合金的耐蚀性能

由于合金中含有较高的 Cr 和 Mo，因此合金既能耐氧化性酸又耐还原性酸的腐蚀，同时在氧化－还原复合酸介质中也耐蚀。在干和湿的氯气中，在亚硫酸、次氯酸盐、醋酸、甲酸、强氧化性盐溶液中都相当耐蚀，在 650℃以上的氟化氢气体中也很耐蚀。表 5.2-48 是几种镍铬钼合金在各种浓度沸腾酸中的腐蚀速度。

表 5.2-48　几种镍铬钼合金在各种浓度沸腾酸中的腐蚀速度

g·$(m^2·h)^{-1}$

合金	盐酸 10%	硫酸 10%	硝酸 10%	醋酸 90%	甲酸 40%	磷酸 55%	氢氟酸 40%	650℃ 70%HF
NS333	—	0.50					28.36	0.15
NS334	6.79	0.58	0.43	0.01	0.07	0.07	—	—
NS335	6.35	0.56	0.15	0.01	0.07	0.06	—	—

图 5.2-24，图 5.2-25，图 5.2-26，图 5.2-27 为几种合金在不同介质中的等腐蚀图。一般情况下镍铬钼系合金在固溶处理状态下，它们的耐蚀性能没有很显著的差别。

对于耐晶间腐蚀性能，则因合金中碳、硅含量的不同而有区别。因为晶间腐蚀的产生原因，主要是由于碳化物（M_6C、M_2C、$M_{23}C_6$）以及拓扑密排相（σ 相、μ 相）在晶界沉淀析出，导致晶界出现贫 Cr、贫 Mo 区，从而易产生晶间腐蚀。所以降低碳、硅、铁的含量，或加入稳定化元素钛等，可以减小晶间腐蚀倾向。NS334、NS335 就是在这一原则上由 NS333 发展而来的。

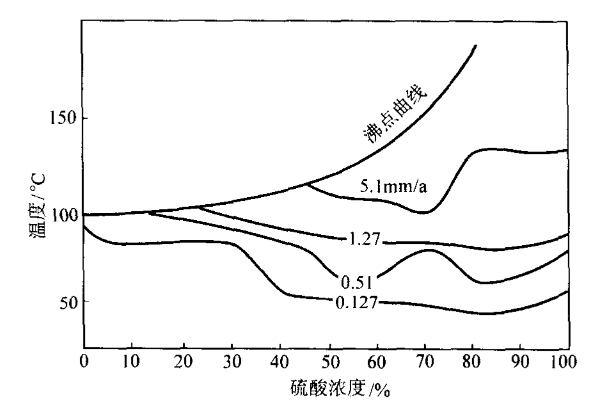


图 5.2-24　NS335 合金在 H_2SO_4 中的等腐蚀图

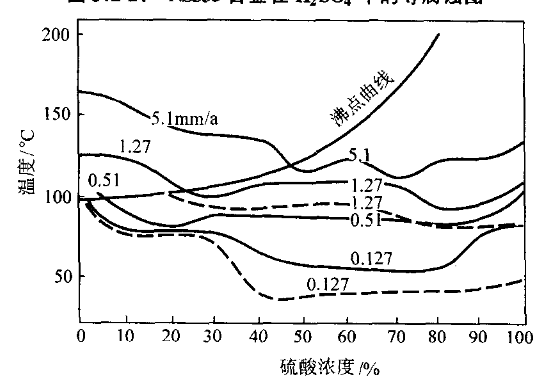


图 5.2-25　NS334 合金在 H_2SO_4（实线）和 H_2SO_4 中加 $200\times10^{-6}Cl^-$ 溶液（虚线）中的等腐蚀图

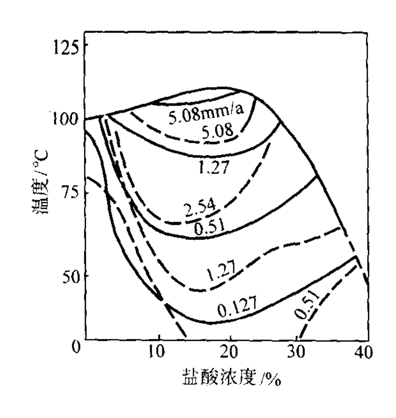


图 5.2-26 NS334 合金在盐酸（实线）和盐酸充氧（虚线）中的等腐蚀图

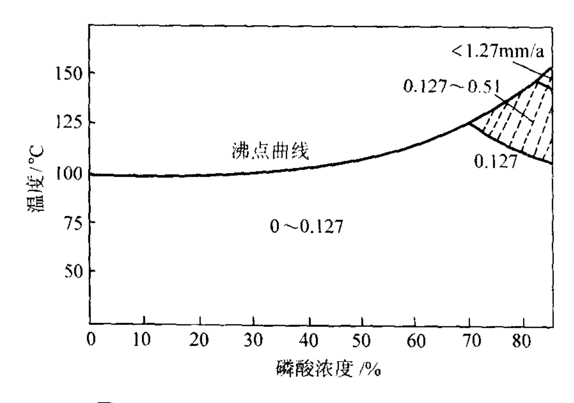


图 5.2-27 NS335 合金在磷酸中的等腐蚀图

镍铬钼合金中由于 Cr、Mo 含量都比较高，因此它们都具有良好的耐点腐蚀和耐缝隙腐蚀性能。特别是 Cr、Mo 含量都超过 15% 的 NS333、NS334、NS335 合金。表 5.2-49 是几种镍铬钼合金在一些介质中耐点腐蚀和缝隙腐蚀的性能。

表 5.2-49 镍铬钼合金耐点腐蚀和缝隙腐蚀性能

合金牌号	点腐蚀			缝隙腐蚀			
	$7\%H_2SO_4$ + $3\%NaCl$ + $1\%CuCl_2$ + $1\%FeCl_3$		$0.1\%NaCl$ + $0.05\%FeCl_3$	$10\%FeCl_3$ mm/a（深度）			$0.1\%NaCl$ + $0.05\%FeCl_3$ mm/a（深度）
	25℃ g/(m²·h)	102℃ g/(m²·h)	88℃ mm/a（深度）	25℃	50℃	75℃	88℃
NS334	0.008	0.610	无	< 0.01	< 0.01	0.04	0.05
NS335	0.008	37.5	—	< 0.01	< 0.01	0.51	—

表 5.2-49 表明，合金中含钨（NS334 合金）对合金耐点腐蚀和缝隙腐蚀有利。

镍铬钼合金抗应力腐蚀性良好，在沸腾的 42% $MgCl_2$ 溶液中 1 000 h 也不产生应力腐蚀。

5.5 镍铬钼系耐蚀合金的工艺性能

镍铬钼系合金由于合金元素含量高，合金的变形抗力较大，热塑性较低，合金的热加工较为困难。但只要在熔炼过程中充分注意脱氧，或采用电渣重熔工艺，同时采用正确的热加工温度，合金可以进行各种热加工变形。一般热加工温度可以控制在 1 200℃左右。合金也可以进行冷加工，但每道次变形量不宜过大，冷加工过程的退火次数要增加。

镍铬钼系合金的可焊性良好，可以用氩弧焊、电弧焊、电阻焊等通用的焊接方法焊接，但应注意避免采用容易使焊缝增碳的焊接方法和工艺，如氧－乙炔焊。焊接时所用焊丝可采用成分与母材相同的焊丝。

5.6 铸造镍铬钼系耐蚀合金

铸造镍铬钼系耐蚀合金，美国有两种牌号（ACI 标准）：CW－12WM－1 和 CW－12M－2。其成分见表 5.2-50。

表 5.2-50 美国铸造镍铬钼系耐蚀合金的牌号与成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%							
	Ni	Cr	Mo	Fe	C	Si	Mn	其他
CW-12M-1	余量	15.5～17.5	16～18	4.5～7.5	≤0.12	≤1.0	≤1.0	V 0.2～0.4 W 3.75～5.25
CW-12M-2	余量	17～20	17～20	≤3.0	≤0.07	≤1.0	≤1.0	

上述合金的室温力学性能见表 5.2-51。

表 5.2-51 铸造镍铬钼系耐蚀合金的室温力学性能

合金牌号	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%
CW-12M-1	496	317	4
CW-12M-2	496	317	25

由于合金中 Cr、Mo 含量高，铸件在冷却时容易形成碳化物和金属间化合物沉淀，对合金的耐蚀性、塑性和可焊性都造成不利影响，故通常要求在 1 175～1 230℃固溶处理后水冷。为了保证合金性能，除控制合金成分外，碳、硫、磷等杂质含量应尽可能降低。

此类合金可以采用弧焊和气焊，并选用与母材成分相近的焊条或焊丝。通常在焊前进行固溶处理水冷，但焊后不需进行热处理。

此类合金适用于强烈腐蚀条件，最常用的是高温条件下有机酸的设施。

5.7 镍铬钼系耐蚀合金的典型应用举例

镍铬钼系耐蚀合金在很多工业部门得到应用，如石油化工、纸浆和造纸工业、酸性油气田的油井生产设备；烟道除硫装置，废料焚化炉的除尘器等。

6 镍铬钼铜系耐蚀合金

在 Ni-Cr-Mo 系合金的基础上添加适量的 Cu，能进一步提高合金在硫酸、磷酸等非氧化性酸中的耐蚀性。我国 GB/T 15007—1994 规定的 Ni-Cr-Mo-Cu 系合金的牌号与成分见表 5.2-52。

表 5.2-52 Ni-Cr-Mo-Cu 系耐蚀合金的牌号与成分

牌号	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe	Ti	C	Si	Mn	P	S
NS341	余量	19.0～21.0	2.0～3.0	1.0～2.0	≤7.0	0.4～0.9	≤0.030	≤0.70	≤1.00	≤0.030	0.030

NS341 合金能耐一些含有 F^-、Cl^- 离子的酸性介质的冲刷冷凝腐蚀，在某些还原性酸、少许氢氟酸加硫酸的混合酸以及氧化－还原性复合介质中都具有良好的耐蚀性。

表 5.2-53 是 NS341 在一些介质中的腐蚀速度。

表 5.2-53　NS341 合金在一些介质中的腐蚀速率

介质成分	温度/℃	试验持续时间	腐蚀速率/mm·a⁻¹
42%的 HF	40	176	0.381 9
4.5mol/L H_2SO_4	50	176	0.098 1
	90	154	0.171 5
10% H_2SO_4 + 0.09% HF	40	154	0.000 9
26% H_2SO_4 + 1.04% HF	70	192	0.154 3 ~ 0.184 8

7　铁镍基耐蚀合金简介

由于镍元素比较稀缺，价格比较贵，为了节约镍，铁镍基耐蚀合金应用也比较广泛。一般不锈钢中镍含量在 30% 以下，而镍基合金镍含量在 50% 以上，铁镍基合金的镍含量则在它们之间。镍含量大于 30%，Ni + Fe > 50%。这类合金也称高镍耐蚀合金，最早是美国的Incoloy 800合金，后来发展为标准型（Cr20Ni32Fe）、高碳型（1Cr20Ni32Fe）、中碳型（0Cr20Ni32Fe）和低碳型（00Cr20Ni32Fe）四种以及NiCrFeMoCu系等系列合金。我国 GB/T 15009—1994 规定的合金牌号和化学成分见表 5.2-54。

表 5.2-54　铁镍基耐蚀合金的牌号与化学成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%											
	Fe	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Ti	C	Si	Mn	S	P
NS111	余量	30.0 ~ 35.0	19.0 ~ 23.0	—	≤0.75	0.15 ~ 0.60	0.15 ~ 0.60	≤0.10	≤1.00	≤1.50	≤0.030	≤0.015
NS112	余量	30.0 ~ 35.0	19.0 ~ 23.0	—	≤0.75	0.15 ~ 0.60	0.15 ~ 0.60	0.05 ~ 0.10	≤1.00	≤1.50	≤0.030	≤0.015
NS113	余量	34.0 ~ 37.0	24.0 ~ 26.5	—	—	0.15 ~ 0.45	0.15 ~ 0.60	≤0.030	0.30 ~ 0.70	0.50 ~ 1.50	≤0.030	≤0.030
NS131	余量	42.0 ~ 44.0	19.0 ~ 21.0	12.5 ~ 13.5	—	—	—	≤0.05	≤0.70	≤1.00	≤0.030	≤0.030
NS141	余量	34.0 ~ 37.0	25.0 ~ 27.0	2.0 ~ 3.0	3.0 ~ 4.0	—	0.40 ~ 0.90	≤0.030	≤0.70	≤1.00	≤0.030	0.030
NS142	余量	38.0 ~ 46.0	19.5 ~ 23.5	2.5 ~ 3.5	1.5 ~ 3.0	≤0.20	0.60 ~ 1.00	≤0.05	≤0.50	≤1.00	≤0.030	0.030
NS143	余量	32.0 ~ 38.0	19.0 ~ 21.0	2.0 ~ 3.0	3.0 ~ 4.0	—	—	≤0.07	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.030

铁镍基耐蚀合金中的 NS111 合金属标准型合金，其碳含量≤0.1%；NS112 属高碳型，碳含量在 0.05% ~ 0.1%，它们的高温蠕变强度较高，主要用于 600℃以上的环境下的化工、石油化工和电力工业中的过热器、再沸器、转化炉管、裂解炉管等。NS131、NS142、NS143 合金属中碳型合金，碳含量在 0.03% ~ 0.05%，一般用于制作 350 ~ 600℃环境下工作的过热器、再沸器等。NS141 合金，属低碳型，碳含量≤0.03%。合金耐应力腐蚀性能优良，多用于制作 300 ~ 650℃环境下工作的蒸发器、换热器等。

表 5.2-55　NS141 合金室温和 350℃的力学性能

品种	状态	室温			350℃		
		抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ/%	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ /%
管材	1 050℃水冷	564 ~ 612	286 ~ 417	34 ~ 37	—	172 ~ 224	40
棒材	1 100℃ 水冷	564 ~ 574	230	46 ~ 54.5	429 ~ 441	112 ~ 150	42.6 ~ 43.2

几种铁镍基耐蚀合金的力学性能如表 5.2-55 和图 5.2-28，图 5.2-29。

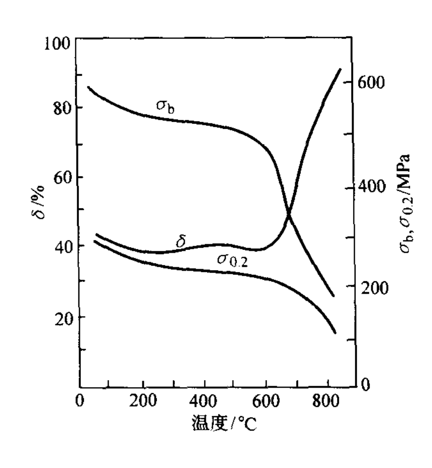


图 5.2-28　NS111 合金室温 ~ 165℃的力学性能（热轧棒材，980℃固溶处理）

铁镍基耐蚀合金都含有较多的 Ni 和 Cr，所以抗氧化性能都较好，在高温水蒸气中，包括蒸汽 - 空气 - 二氧化碳的混合气中都具有优良的耐蚀性。在 400℃下，耐 H_2 + H_2S 气体的腐蚀性能优良。此类合金的耐应力腐蚀性优良，在含Cl^-

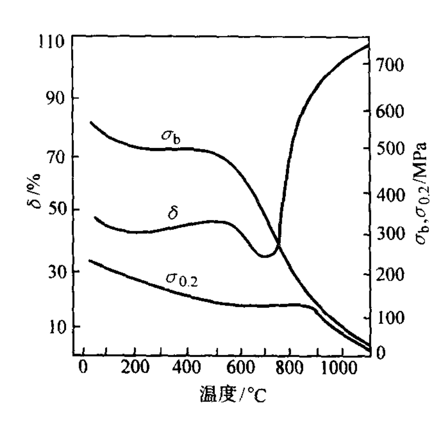


图 5.2-29　NS112 合金室温～1 100℃的力学性能（挤压管材，1 095℃固溶处理）

的水中和含 NaOH 的水溶液中低碳型合金的耐应力腐蚀都优于 Cr－Ni 不锈钢。

此类合金的冷、热加工性能都比较好。其热处理制度则随碳含量不同而有区别，对于高碳型合金一般在 1 150～1 205℃固溶处理后水冷，而低碳型合金则在 980℃ ± 10℃固溶处理后空冷或水冷。合金的焊接性能良好，可用各种常用焊接方法焊接。

编写：唐仁政（中南大学）
审稿：田荣璋（中南大学）

第3章 镍基高温合金

1 概述

高温合金是指能在600℃以上的高温下，抗氧化、抗热腐蚀并在一定应力作用下长时间工作的一类金属材料，这类合金一般合金化程度都比较高，美、英等国都称为超合金(Superalloy)。镍基高温合金是用量最大、最重要的高温合金，主要用于制造航空发动机、航天火箭发动机、工业燃气轮机等高温部件，也在能源动力、交通运输、石油化工、冶金等部门获得了广泛应用，是国防建设和国民经济发展的重要材料，特别是在先进的航空发动机中，高温合金的用量占发动机总材料用量的40%～60%，可以说没有高性能的高温合金就没有先进的航空工业，无法制造先进的飞机。同时镍基高温合金是一种质量要求十分严格的金属材料，它不仅要有高的高温强度、抗高温氧化、耐热腐蚀，还要求具有良好的疲劳性能、断裂韧性、塑性、组织稳定性、工作的高可靠性等，所以镍基高温合金的研制生产是一个国家金属材料发展水平的重要标志之一。

因此，镍基高温合金的总产量虽然不很大，它只占镍基合金总产量的20%左右（而镍基合金中镍的消耗量又只占镍的总消耗量的12%左右），但它是最受重视、研究得很深入、发展很快的镍合金，也可以说是最重要的镍合金。

镍基高温合金是从20世纪30年代开始发展起来的。由于航空发动机要求增大推力、降低油耗，对发动机涡轮前温度要求不断提高，因此制造涡轮机的材料能承受的工作温度要求也不断提高，从而推动了高温合金的发展，现在镍基高温合金的最高使用温度已达1 100℃。

我国从20世纪50年代开始研制镍基高温合金，最初主要是仿制前苏联的高温合金，到70年代开始引进欧美发动机，相应地引进和试制了一批欧美系列的镍基高温合金。经过40多年的努力，我国已研制成功了镍基高温合金70多种。这些合金除大部分是仿制前苏联和欧美国家的高温合金外，也有一部分是我国自行研制的具有独创性的镍基高温合金，如GH4133、GH4133B，已成为我国目前应用最广的盘件材料。

镍基高温合金化学成分十分复杂，一般含有十多种合金元素，有些合金元素的含量比较高，这些合金元素的作用是产生固溶强化、沉淀强化、晶界强化和弥散强化等。如W、Mo、Cr、Co是主要的固溶强化元素，Al、Ti、Nb主要是形成γ'、γ''相的沉淀强化元素，W、Ta、Ti、Mo、Nb、Hf等是形成碳化物强化的元素，B、Zr、Hf等是晶界强化元素。

镍基高温合金分变形高温合金、铸造高温合金和粉末冶金高温合金。变形合金中有固溶强化型和沉淀强化型两类；铸造合金中有普通等轴晶高温合金、定向凝固高温合金和单晶高温合金。

我国高温合金的牌号表示方法是根据合金的成形方式、强化类型和基体元素，采用汉语拼音字母符号作前缀、其后再接阿拉伯数字。变形高温合金用GH作前缀（G、H分别为高、合两字汉语拼音的第一字母）。后面接四位阿拉伯数字。第一位数字表示合金分类：1和2表示铁基和铁镍基，3、4表示镍基，5、6表示钴基。第1位数字奇数1、3、5表示固溶强化型，偶数2、4、6表示沉淀强化型。第二、三、四位数字表示合金的编号。例如：GH3030表示变形镍基固溶强化型高温合金，编号为30；GH4133表示变形镍基沉淀强化型高温合金，编号为133。

铸造高温合金用字母K作前缀，后面接三位阿拉伯数字其含义与变形合金相同，例如：K423表示铸造镍基沉淀强化型合金，编号为23。定向凝固高温合金用字DZ作前缀、单晶高温合金用DD作前缀，后面数字为合金编号。粉末冶金高温合金用FGH作前缀，后面的数字含义与变形高温合金相同。

以上合金牌号表示分法是已列入国标的合金，尚有部分未纳入国标的合金，仍然采用原来牌号，例如GH80、GH93、GH145等，数字表示合金编号。

本章只对镍基高温合金作简要介绍，更详细的资料数据可参见本大典第3卷。

2 镍基变形高温合金

由于镍具有最好的稳定性，能固溶更多的合金元素也不易生成有害相，能通过充分的固溶强化和沉淀强化来提高合金的强度和延长使用寿命，同时又具有良好的加工性能，可以通过锻造、轧制、挤压、拉拔、冲压等热、冷变形加工工艺，制成棒、板、带、管、丝、饼、环等各种形状、尺寸的材料。而且镍的价格又远远低于钴，所以镍基变形高温合金是世界上牌号数量最多，应用最广泛的高温合金。我国随着金川镍都的开发，镍产量的提高，以及国际镍资源的流通，镍基变形高温合金也成为我国研究得最多、应用最广泛的高温材料。

2.1 固溶强化型镍基变形高温合金

固溶强化型镍基变形高温合金主要是加入Cr、W、Mo、Co、Fe等元素固溶于镍基体而产生固溶强化，也有些合金还加入少量的Al、Ti、Nb，也可以固溶强化，还形成少量γ'、γ''相辅以沉淀强化，合金一般用于高温下工作的载荷较小的静止部件，如火焰筒、燃气导管等。

2.1.1 固溶强化型镍基变形高温合金的牌号与成分

固溶强化型镍基变形高温合金的牌号与化学成分见表5.3-1。

2.1.2 固溶强化型镍基变形高温合金的力学性能

技术标准规定的固溶强化型镍基变形高温合金的拉伸性能和持久性能如表5.3-2，其高温持久强度见表5.3-3。

2.1.3 固溶强化型镍基变形高温合金的工艺性能

固溶强化型镍基变形高温合金的冷、热加工性能优良，其热加工工艺参数见表5.3-4，合金的热处理通常是固溶处理，有时也进行消除应力处理或退火处理，其热处理工艺参数见表5.3-5。这类合金的焊接性能优良，可以用氩弧焊、缝焊和点焊、电阻焊等方法焊接。

2.2 沉淀强化型镍基变形高温合金

沉淀强化型镍基变形高温合金是在固溶强化的基础上提高合金中Al、Ti、Nb等元素的含量，以增加γ'和γ''相的数量，并通过合理的固溶处理和时效处理工艺，以获得合适的沉淀相尺寸和析出数量，达到最佳的沉淀强化的效果。因此热处理制度对合金的性能影响很大，对热处理工艺要求比较严格。

表 5.3-1　固溶强化型镍基变形高温合金的牌号与成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%										
	C	Ni	Cr	Fe	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	其他
GH3030	≤0.12	余	19.0~22.0	≤1.5	—	—	—	≤0.15	0.15~0.35	—	
GH3039	≤0.08	余	19.0~22.0	≤3.0	—	—	1.80~2.30	0.35~0.75	0.35~0.75	0.9~1.3	
GH3044	≤0.10	余	23.5~26.5	≤4.0	—	13.0~16.0	≤1.50	≤0.50	0.30~0.70	—	
GH3128	≤0.05	余	19.0~22.0	≤0.2	—	7.5~9.0	7.5~9.0	0.40~0.80	0.40~0.80	—	Zr 0.04 Ce 0.05
GH3536	0.05~0.15	余	20.5~23.0	17.0~20.0	0.50~2.50	0.20~1.00	8.0~10.0	≤0.50	0.15	—	
GH3625	≤0.10	余	20.0~23.0	≤5.00	≤1.00	—	8.0~10.0	≤0.40	≤0.40	3.15~4.15	
GH170	≤0.06	余	18.0~22.0	—	15.0~22.0	17.0~21.0	—	≤0.50	—	—	Zr 0.15 La 0.05

表 5.3-2　技术标准规定的固溶强化型镍基变形高温合金的拉伸性能和持久性能

合金牌号	拉伸性能				持久性能				品种与状态
	温度 /℃	抗拉强度 σ_b/MPa ≥	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa ≥	伸长率 δ_5/% ≥	温度 /℃	应力 σ/MPa	断裂时间 /h ≥	伸长率 δ_5/% ≥	
GH3030	20 700	685 295	—	30 30	— —	— —	— —	— —	板材，固溶处理
GH3039	20 800	735 245	— —	40 40	— —	— —	— —	— —	板材，固溶处理
GH3044	20 900	735 195	— —	40 30	— —	— —	— —	— —	板材，固溶处理
GH3128	20 950	735 175	— —	40 40	950 950	39 54	100 23	实测 实测	交货状态 + 1 200℃冷空
GH3536	20	725	310	35	815	110	24	8.0	冷轧薄板
GH3625	20	830	410	30	815	114	23	15	板材
GH170	20 1 000	735 135	— —	40 4	1 000	39	100	— —	固溶处理

表 5.3-3　固溶强化型镍基变形高温合金板材的持久强度
（1 000 h 的持久强度）　MPa

合金牌号	温度/℃									
	700	750	760	800	850	870	900	950	980	1 000
GH3030	64	—	—	30	—	—	10	—	—	—
GH3039	100	—	—	32	—	—	16	—	—	—
GH3044	—	—	—	75	—	—	30	—	—	—
GH3128	193	—	—	91	61	—	38	24	—	15
GH3536	170	110	100	70	39	—	20	—	14	—
GH170	—	—	—	134	—	—	64	38	—	19

表 5.3-4　固溶强化型镍基变形高温合金的热加工工艺参数

合金牌号	热加工温度/℃			
	锻造加热温度	终锻温度	热轧加热温度	终轧温度
GH3030	1 180~1 200	≥900	1 160~1 180	—
GH3039	1 170~1 190	≥900	粗轧 1 100~1 140 热精轧 1 050~1 100	≥850
GH3044	1 170 ± 10	≥900	1 130 ± 10	≥800
GH3128	1 160 ± 10	≥900	1 140~1 180	≥800
GH3536	1 170 ± 10	≥950	1 150 ± 10	≥850
GH3625	1 120	≥930	1 120~1 160	≥930
GH170	1 120 ± 10	≥950	热粗轧 1 150 ± 10 热精轧 1 120 ± 10	—

表 5.3-5　固溶强化型镍基变形合金的热处理工艺参数

热处理工艺	合金牌号						
	GH 3030	GH 3039	GH 3044	GH 3128	GH 3536	GH 3625	GH 170
固溶处理温度/℃	1 000 1 150①	1 050 1 170①	1 150 1 200①	1 200 ± 10	1 150 ± 10	1 090 ~ 1 200	1 230
中间热处理温度/℃	—	—	1 140 ± 10	1 100 ± 20	—	930 ~ 1 040	1 170 ± 10
消除应力处理温度/℃	—	—	—	—	870 ± 10	900	

① 为要求有较高热强性的零件的固溶处理温度。

2.2.1　沉淀强化型镍基变形高温合金的牌号与化学成分

沉淀强化型镍基变形高温合金是牌号最多的镍基高温合金，其牌号与化学成分见表 5.3-6。

2.2.2　沉淀强化型镍基变形高温合金的力学性能

技术标准规定的沉淀强化型镍基变形高温合金的拉伸性能及持久性能见表 5.3-7，其高温持久强度见表 5.3-8。

2.2.3　沉淀强化型镍基变形高温合金的工艺性能

沉淀强化型镍基变形高温合金一般都具有较好的热加工性能，但不同牌号（成分）的合金加工性能差别较大，随合金化程度的提高，特别是 Al、Ti 含量的增加，其加工性能变差，有的合金热加工比较困难，例如 GH4698 对热加工温度极为敏感，在开坯过程中容易开裂，需要对铸锭进行高温长时间均匀化退火，以消除 γ' 相偏析，改善加工性能。对于

表 5.3-6　沉淀强化型镍基变形高温合金的牌号与化学成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%											
	C	Ni	Cr	Fe	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	B	其他
GH4033	0.03 ~ 0.08	余量	19.0 ~ 22.0	≤4.0	—	—	—	0.60 ~ 1.00	2.40 ~ 2.80	—	≤0.010	
GH4037	0.03 ~ 0.10	余量	13.0 ~ 16.0	≤5.0	—	5.00 ~ 7.00	2.0 ~ 4.0	1.70 ~ 2.30	1.80 ~ 2.30	—	≤0.020	V.0.10 ~ 0.50
GH4049	0.04 ~ 0.10	余量	9.5 ~ 11.0	≤1.5	14.0 ~ 16.0	5.0 ~ 6.0	4.5 ~ 5.5	3.7 ~ 4.4	1.4 ~ 1.9	—	—	V.0.20 ~ 0.50 Ce 0.02
GH4099	≤0.08	余量	17.0 ~ 20.0	≤2.0	5.0 ~ 8.0	5.0 ~ 7.0	3.5 ~ 4.5	1.70 ~ 2.40	1.0 ~ 1.5	—	≤0.005	Ce.0.01
GH4133	≤0.07	余量	19.0 ~ 22.0	≤1.50	—	—	—	0.70 ~ 1.20	2.50 ~ 3.00	1.15 ~ 1.6	≤0.01	Ce 0.01
GH4133B	≤0.06	余量	19.0 ~ 22.0	≤1.50	—	—	—	0.75 ~ 1.15	2.50 ~ 3.00	1.30 ~ 1.70	≤0.01	Mg0.001 ~ 0.01 Zr0.01 ~ 0.10
GH4169	≤0.08	50.0 ~ 55.0	17.0 ~ 21.0	余量	≤1.0	—	2.80 ~ 3.30	0.30 ~ 0.70	0.75 ~ 1.15	4.75 ~ 5.50	≤0.006	Mg0.01
GH4220	≤0.08	余量	9.0 ~ 12.0	≤3.0	14.0 ~ 15.5	5.0 ~ 6.5	5.0 ~ 7.0	3.90 ~ 4.80	2.20 ~ 2.90	—	—	V 0.25 ~ 0.80 Ce 0.02 Mg0.01
GH4698	≤0.08	余量	13.0 ~ 16.0	≤2.0	—	—	2.8 ~ 3.2	1.30 ~ 1.70	2.35 ~ 2.75	1.80 ~ 2.20	≤0.005	Mg.0.008 Ce.0.005 Zr.0.05
GH80A	0.04 ~ 0.10	余量	18.0 ~ 21.0	≤1.5	≤2.0	—	—	1.00 ~ 1.80	1.8 ~ 2.7	—	≤0.008	—
GH90	≤0.13	余量	18.0 ~ 21.0	≤1.5	15.0 ~ 21.0	—	—	1.0 ~ 2.0	2.0 ~ 3.0	—	0.020	—
GH105	0.12 ~ 0.17	余量	14.0 ~ 15.7	≤1.0	18.0 ~ 22.0	—	4.5 ~ 5.5	4.5 ~ 4.9	1.18 ~ 1.5	—	0.003 ~ 0.010	Zr0.07 ~ 0.15
GH141	0.06 ~ 0.12	余量	18.0 ~ 20.0	≤5.0	10.0 ~ 12.0	—	9.0 ~ 10.5	1.40 ~ 1.80	3.00 ~ 3.50	—	0.003 ~ 0.010	Zr 0.07
GH145	≤0.08	余量	14.0 ~ 17.0	5.00 ~ 9.00	1.00	—	—	0.40 ~ 1.00	2.25 ~ 2.72	—	—	Nb + Ta 0.70 ~ 1.20
GH163	0.04 ~ 0.08	余量	19.0 ~ 21.0	≤0.70	19.0 ~ 21.0	—	5.6 ~ 6.1	0.30 ~ 0.60	1.90 ~ 2.40	—	0.005	
GH500	≤0.12	余量	18.0 ~ 20.0	≤4.0	15.0 ~ 20.0	—	3.0 ~ 5.0	2.75 ~ 3.25	2.75 ~ 3.25	—	0.003 ~ 0.008	Zr 0.06
GH710	≤0.10	余量	16.5 ~ 19.5	≤1.0	13.5 ~ 16.0	1.0 ~ 2.0	2.5 ~ 3.5	2.0 ~ 3.0	4.5 ~ 3.5	—	0.01 ~ 0.03	Zr 0.06 Ce 0.02
GH738	0.03 ~ 0.10	余量	18.0 ~ 21.0	≤2.0	12.0 ~ 15.0	—	3.50 ~ 5.00	1.20 ~ 1.60	2.75 ~ 3.25		0.003 ~ 0.010	Zr 0.02 ~ 0.08
GH742	0.04 ~ 0.08	余量	13.0 ~ 15.0	≤1.0	9.0 ~ 11.0	—	4.5 ~ 5.5	2.4 ~ 2.8	2.4 ~ 2.8	2.4 ~ 2.8	0.01	Ce.0.01 La0.10

表 5.3-7　技术标准规定的沉淀强化型镍基变形高温合金的拉伸性能和持久性能

合金牌号	品种与状态	拉伸性能					持久性能		
		温度 /℃	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ_5/%	断面收缩率 ψ/%	温度 /℃	应力 σ/MPa	断裂时间 /h ≥
			≥						
GH4033	棒材	20 700	880 685	590 —	13 15	16 20	700	430	60
GH4037	棒材，标准热处理	800	665	—	5.0	8.0	800 850	245 196	100 50
GH4049	棒材	900	570	—	8.0	12.0	900	275 215	20 80
GH4099	板材 固溶处理	20 900	1 130 375	— —	30 15	— —	900	118	23
GH4133	标准热处理	20	1 060	735	16	18	750	294	100
GH4169	棒材、纵向 固溶时效	20 650	1 280 1 000	1 030 860	12 12	15 15	650	690	25
GH4220	棒材	950	490	—	8.0	11.0	940 900	215 275	40 55
GH4698	锻件	20	1 130	705	17.0	19.0	750	412 363	50 100
GH80A	棒材 板材	20 20	1 000 1 030	620 640	20 25	— —	750 750	340 340	32（平均值） 30
GH90	冷拉棒材 冷轧薄板	650 20	820 1 310	590 1 000	8 10	— —	870 870	140 140	30 30
GH105	热轧棒材 冷拉棒材	700	1 000	680	18	—	815 950 650	360 110 465	42（平均值） 42（平均值） 100(变形 0.1%)
GH141	园饼、环坯 固溶时效 棒材 固溶时效	760 20 800	835 1 175 735	620 880 635	12 12 15	15 12 20	900 800	172 588	20 90
GH145	带、板、管材 固溶时效	20	1 170	795	18	—	730	362	23
GH163	棒材、锻件	780	540	400	12	—	780	120	50
GH500	棒材	20	1 100	750	10	—	750 870	490 215	30(缺口试样) 50(光滑试样)
GH710	锻件	20	980	815	4	实测	980 815	120 420	30(光滑试样) 30(缺口试样)
GH738	棒材	815	608	—	20	32	815	328	23
GH742	模锻件	20	1 210	755	13	14	750 650	539 834	50 50

表 5.3-8 沉淀强化型镍基变形高温合金的高温持久强度

合金牌号	持久强度/MPa	温度/℃								
		600	650	700	750	800	850	900	950	1 000
GH4033	σ_{100}	686	588	441	294	245	—	—	—	—
	$\sigma_{1\,000}$	588	470	314	200	118	—	—	—	—
GH4037	σ_{100}	—	—	471	—	275	186	127	—	—
	$\sigma_{1\,000}$	—	—	314	—	167	98	—	—	—
GH4049	σ_{100}	—	—	742	—	470	379	—	—	—
	$\sigma_{1\,000}$	—	—	591	—	336	219	—	—	—
GH4099	σ_{100}	—	—	523	360	273	170	102	54	26
	$\sigma_{1\,000}$	—	—	378	270	165	100	49	23	9.7
GH4133	σ_{100}	—	701	508	356	239	—	—	—	—
	$\sigma_{1\,000}$	—	518	381	266	149	—	—	—	—
GH4169	σ_{100}	884	700	515	—	—	—	—	—	—
	$\sigma_{1\,000}$	767	573	393	—	—	—	—	—	—
GH4690	σ_{100}	—	667 ~ 691	—	378 ~ 402	—	—	—	—	—
	$\sigma_{1\,000}$	—	559 ~ 583	—	255 ~ 284	—	—	—	—	—
GH4220	σ_{100}	—	—	755	559	471	363	265	196	88
	$\sigma_{1\,000}$	—	—	—	441	363	225	167	108	—
GH80A	σ_{100}	—	470	394	270	193	127	58	—	23
	σ_{300}	—	425	343	229	154	93	—	—	—
GH90	σ_{100}	—	—	569	392	—	186	—	—	—
	$\sigma_{1\,000}$	—	—	402	284	—	93	—	—	—
GH105	σ_{100}	—	—	516	374（740℃）	306	208（860℃）	147	69（960℃）	37
	$\sigma_{1\,000}$	—	—	388	321	225	136	85	39	20
GH141	σ_{100}	—	—	—	410（760℃）	260	140	—	—	—
	σ_{200}	—	—	—	370	230	120	—	—	—
GH163	σ_{100}	—	—	420	—	210	—	59	—	—
	$\sigma_{1\,000}$	—	—	340	—	135	—	37	—	—
GH170	σ_{100}	—	—	—	—	186	—	88	67	44
	$\sigma_{1\,000}$	—	—	—	—	134	—	64	38	19
GH500	σ_{100}	—	—	640	510	390	280	170	—	—
	$\sigma_{1\,000}$	—	—	520	380	280	190	115	—	—
GH710	σ_{100}	—	—	—	608（730℃）	412（815℃）	304（870℃）	—	108(980℃)	—
GH738	σ_{100}	—	736	520（730℃）	—	289（815℃）	—	—	—	—
	$\sigma_{1\,000}$	—	620	382	—	196	—	—	—	—
GH742	σ_{100}	—	814 ~ 873	—	510 ~ 530	329 ~ 373	—	—	—	—
	$\sigma_{1\,000}$	—	721 ~ 765	—	373 ~ 417	—	—	—	—	15

GH710、GH742合金甚至经过均匀化处理后，热加工仍然非常困难。美、俄等国常采用大型挤压设备进行挤压开坯，随后采用等温锻造、热模锻等方法进行热加工。我国由于设备条件所限，无法采用这些工艺方法，为解决这些合金热加工困难的难题，我国采用包套轧制和包套模锻的方法，取得了良好的效果。

这类合金一般的热加工工艺参数见表5.3-9。

沉淀强化型镍基变形高温合金可以采用氩弧焊焊接，但在热影响区比较容易产生裂纹，焊接后应立即进行消除应力退火。

热处理是控制沉淀强化型镍基变形高温合金沉淀强化相的大小、数量、形状的重要工艺过程，从而对合金最终性能（尤其是力学性能）产生重要影响，随着合金的牌号不同、应用要求不同，有多种不同的热处理制度，通常采用的所谓

标准热处理制度见表5.3-10。

表5.3-9 沉淀强化型镍基变形高温合金的热加工工艺参数

合金牌号	热加工温度/℃			
	锻造加热温度	终锻温度	热轧加热温度	终轧温度
GH4033	1 120 ~ 1 140	950	1 140 ~ 1 160	980
GH4037	1 160	1 000	1 150 ~ 1 180	1 020
GH4049	1 170 ± 10	1 050	1 160 ± 10	1 020
GH4099	1 120 ~ 1 160	980	1 110 ~ 1 150	850
GH4133	1 160 ~ 1 180	950		
GH4169	1 065 ~ 1 090	930 ~ 950	< 1 120	
GH4220	1 120 ~ 1 140	模锻10 s内完成	1 160 ~ 1 180	1 020
GH4698	1 160 ~ 1 180	大尺寸锻件包套模锻		
GH80A	1 120 ~ 1 150	950	1 120 ~ 1 150	930
GH90	1 150 ± 10	950	1 160	950
GH93	1 130 ~ 1 150	950	1 150 ~ 1 170	1 000
GH105	1 150 ± 10		1 150 ~ 1 170	1 060
GH141	1 160 ~ 1 180	1 000	1 140 ~ 1 160	1 060
GH145	1 120	950		
GH163	1 120 ± 10	900	1 130 ± 10	
GH170	1 120 ± 10	950	1 130 ± 10	
GH500	1 160	1 010	1 170	1 050
GH710	1 130 ~ 1 140	1 000	1 150	980
GH738	1 150 ~ 1 170	1 000		
GH742	1 100 ± 20			

表5.3-10 沉淀强化型镍基变形高温合金的热处理工艺

合金牌号	标准热处理制度
GH4033	1 080℃，8 h，空冷 + 700℃或750℃，16 h，空冷
GH4037	1 170 ~ 1180℃，2 h空冷 + 1 050℃ ± 10℃，4 h，缓冷，+ 800℃ ± 10℃，16 h，空冷
GH4049	1 200℃ ± 10℃，2 h，空冷 + 1 050℃ ± 10℃，4 h，空冷 + 850℃ ± 10℃，8 h，空冷
GH4099	1 120 ~ 1 160℃，空冷 + 900℃ ± 10℃，4 h，空冷
GH4133	1 080℃ ± 10℃，8 h，空冷 + 750℃ ± 10℃，16 h，空冷
GH4169	1 010 ~ 1 065℃ ± 10℃，1 h，空冷或水冷 + 720℃ ± 5℃，8 h，炉冷至620℃ ± 5℃，8 h，空冷
GH4220	1 220℃ ± 10℃，4 h，空冷 + 1 050℃ ± 10℃，4 h，空冷 + 950℃ ± 10℃，2 h，空冷
GH4698	1 120℃ ± 10℃，8 h，空冷 + 1 000℃ ± 10℃，4 h，空冷 + 775℃ ± 10℃，16 h，空冷
GH80A	1 080℃ ± 10℃，8 h，空冷 + 700℃ ± 5℃，16 h，空冷

续表5.3-10

合金牌号	标准热处理制度
GH90	1 080℃ ± 10℃，4 h，空冷 + 750℃ ± 10℃，4 h，空冷
GH105	1 150℃ ± 10℃，4 h，空冷 + 1 030℃ ± 10℃，16 h，空冷 + 700℃ ± 5℃，16 h，空冷
GH141	1 080℃ ± 10℃，快冷 + 1 120℃ ± 10℃，0.5 h，空冷 + 900℃ ± 10℃，1 ~ 4 h，空冷
GH145	1 150℃ ± 15℃，2 ~ 4 h，空冷 + 845℃ ± 15℃，24 h，空冷 + 705℃ ± 15℃，24 h，空冷
GH163	1 150℃ ± 10℃，1.5 ~ 2.5 h，水冷800℃ ± 10℃，8 h，空冷
GH500	1 120℃ ± 10℃，2 h，空冷 + 1 080℃ ± 10℃，4 h，空冷 + 845℃ ± 5℃，24 h，空冷 + 760℃ ± 5℃，16 h，空冷
GH710	1 170℃ ± 10℃，4 h，空冷 + 1 080℃ ± 10℃，4 h，空冷 + 845℃ ± 10℃，24h，空冷 + 760℃ ± 10℃，16 h，空冷
GH738	1 080℃ ± 10℃，4 h，空冷 + 840℃，24 h，空冷 + 760℃，16 h，空冷
GH742	1 090 ~ 1 120℃，8 h，空冷 + 850℃ ± 10℃，4 ~ 8 h，空冷 + 780℃ ± 10℃，10 ~ 16 h，空冷

3 镍基铸造高温合金

镍基铸造高温合金是以镍为基、铝和钛含量比较高、合金元素种类多（通常有十多种合金元素），γ′相的体积分数比较大的沉淀强化型合金，因此合金的热强性高。随着合金热强性的提高，合金中γ′相的体积分数由早期的25%以下逐渐增加到现在的65%以上。由于镍基铸造高温合金的合金化程度高，加之在凝固过程中不可避免会出现成分偏析，因此，在长期工作中可能析出有害的拓扑密排相（如σ相、μ相、Laves相等）。为了获得合金所需要的高温强度、抗氧化性、耐腐蚀性等全面性能的同时，还需要保证在长期工作中组织稳定，不析出有害相，就需要严格选择合适的成分，平衡和优化最佳的铸造工艺。

在镍基铸造高温合金发展过程中，开始是普通的等轴晶铸造合金，到20世纪60年代中期开始发展了定向凝固合金，到70年代初期又发展了单晶高温合金。

3.1 普通等轴晶镍基铸造高温合金

3.1.1 普通等轴晶镍基铸造高温合金的牌号与化学成分

普通等轴晶镍基铸造高温合金都是以γ′、γ″相强化的沉淀强化型合金，也是应用最早、最广、品种牌号最多的铸造高温合金，其牌号与化学成分见表5.3-11。

3.1.2 等轴晶镍基铸造高温合金的力学性能

技术标准规定的等轴晶镍基铸造高温合金的拉伸性能和持久性能见表5.3-12，合金在不同温度下的持久强度见表5.3-13。

3.1.3 等轴晶镍基铸造高温合金的工艺性能

等轴晶镍基铸造高温合金一般都具有良好的铸造性能，大都采用熔模精密铸造工艺，可铸造出薄壁空心铸件，浇注温度通常都在1 400 ~ 1 450℃，模壳加热温度为800 ~ 900℃。在镍基铸造高温合金的发展过程中，熔炼铸造工艺的发展起了极为重要的作用，真空熔炼技术以及较快冷速的壳型的采用对提高合金性能起到重要作用。合金大都可以进行氩弧焊或钎焊焊接。

表 5.3-11 等轴晶镍基铸造高温合金的牌号与成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%											
	C	Ni	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	Fe	B	Zr	其他
K403	0.11～0.18	余量	10.0～12.0	4.5～6.0	4.8～5.5	3.8～4.5	5.3～5.9	2.3～2.9	—	≤2.0	0.012～0.022	0.03～0.08	
K405	0.10～0.18	余量	9.5～11.0	9.5～10.5	4.5～5.2	3.5～4.2	5.0～5.8	2.0～2.9	—	<0.5	0.015～0.026	0.05～0.10	
K406	0.10～0.20	余量	14.0～17.0	—	—	4.5～6.0	3.25～4.0	2.0～3.0	—	≤1.0	0.05～0.10	0.03～0.08	
K409	0.08～0.13	余量	7.5～8.5	9.5～10.5	≤0.10	5.75～6.25	5.75～6.25	0.8～1.2	—	≤0.35	0.01～0.02	0.05～0.10	Ta 4.0～4.5
K417	0.13～0.22	余量	8.5～9.5	14.0～16.0	—	2.5～3.5	4.8～5.7	4.5～5.0	—	≤1.0	0.012～0.022	0.05～0.09	V 0.6～0.9
K417G	0.13～0.22	余量	8.5～9.5	9.0～11.0	—	2.5～3.5	4.8～5.7	4.1～4.7	—	≤1.0	0.012～0.024	0.05～0.09	V 0.6～0.9
K418	0.08～0.16	余量	11.5～13.5	—	—	3.8～4.8	5.5～6.4	0.5～1.0	1.8～2.5	≤1.0	0.008～0.020	0.06～0.15	
K418B	0.03～0.07	余量	11.0～13.0	—	—	4.0～5.0	5.5～6.4	0.4～0.9	1.5～2.5	≤0.5	0.005～0.015	0.06～0.15	
K419	009～0.14	余量	5.5～6.5	11.0～13.0	9.5～10.5	1.7～2.3	5.2～5.7	1.0～1.5	2.5～3.3	≤0.5	0.05～0.10	0.03～0.08	
K423	0.12～0.18	余量	14.5～16.5	9.0～10.5	—	7.6～9.0	3.9～4.4	3.4～3.8	—	≤0.5	0.004～0.008	—	
K423A	0.12～0.18	余量	14.0～15.5	8.2～9.5	≤0.20	6.8～8.3	3.9～4.4	3.4～3.8	≤0.25	≤0.5	0.005～0.015	—	
K424	0.14～0.20	余量	8.5～10.5	12.0～15.0	1.0～1.8	2.7～3.4	5.0～5.7	4.2～4.7	0.5～1.0	≤2.0	0.015	0.02	Ce 0.02
K441	0.02～0.10	余量	15.0～17.0	-	12.0～15.0	1.5～3.0	3.10～4.00	—	—	—	0.001～0.10	≤0.05	
K477	0.05～0.09	余量	14.0～15.25	14.0～16.0	—	3.9～4.5	4.0～4.6	3.0～3.7	2.5～3.3	≤0.5	0.012～0.020	≤0.04	V≤0.10
K4002	0.13～0.17	余量	8.0～10.0	9.0～11.0	9.0～11.0	≤0.5	5.25～5.75	1.25～1.75	—	≤0.5	0.01～0.02	0.03～0.08	Ta 2.25～2.75 Hf1.3～1.7 V≤0.10

表 5.3-12 技术标准规定的等轴晶镍基铸造高温合金的拉伸性能和持久性能

合金牌号	拉伸性能					持久性能		
	温度/℃	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ_5/%	断面收缩率 ψ/%	温度/℃	应力 σ/MPa	断裂时间/h ≥
		≥						
K403	800	785	—	2	3	975	195	50
K405	900	675	—	6	8	750 900 950	685 315 215	45 80 80

续表 5.3-12

合金牌号	拉伸性能					持久性能		
	温度/℃	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ_5/%	断面收缩率 ψ/%	温度/℃	应力 σ/MPa	断裂时间/h ≥
		≥						
K406	800	665	—	4	8	850	245 275	100 50
K409	室温	830	725	5	—	760 980	645 200	23 30

续表 5.3-12

合金牌号	拉伸性能 温度/℃	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ_5/%	断面收缩率 ψ/%	持久性能 温度/℃	应力 σ/MPa	断裂时间/h ≥
		≥						
K417	900	635	—	6	8	900 950	315 235	70 40
K417G	900	635	—	6	8	900 950	315 235	70 40
K418	室温	755	635	3	—	750 800	605 490	40 45
K418B	室温	760	690	5	—	760 980	530 150	50 30
K419	—	—	—	—	—	750 950	685 225	45 80
K423	室温	850	750	3	—	850	325	32
K423A	室温	850	750	3	—	850	325	32
K424	室温	835	—	5	7	975	196	40
K441						980	83	18
K477	室温 870	690 415	675 370	— —	6 2	980	150	20
K4002	—	—	—	—	—	760 1 040	695 124	82 42

表 5.3-13 等轴晶镍基铸造高温合金的持久强度

合金牌号	持久强度/MPa 700℃ σ_{100}	700℃ $\sigma_{1\,000}$	800℃ σ_{100}	800℃ $\sigma_{1\,000}$	900℃ σ_{100}	900℃ $\sigma_{1\,000}$	950℃ σ_{100}	950℃ $\sigma_{1\,000}$	1 000℃ σ_{100}	1 000℃ $\sigma_{1\,000}$
K403	749	638	524	398	298	212	—	—	151	95
K405	799	716	574	448	323	221	225	144	150	91
K406	669	699	389	279①	—	—	—	—	—	—
K409	628②	539②	510③	402③	324	266	—	—	—	—
K417	760	-	570	—	314	—	210	—	150	—
K417G	792	712	580	460	335	240	—	—	143	—
K418	725	627	480	363	274	176	167	118	118	—
K418B	690	595	485	—	240	155	-	—	—	—
K419	823	755	563	456	382	256	264	171	186	116
K423	520④	—	305⑤	—	—	—	170	110	—	—
K423A	577④	460④	381⑤	250⑤	252	180	—	—	—	—
K424	602④	560④	420⑤	318⑤	320	215	230	150	150	98
K441	413④	—	341	—	169	—	106	—	50	—
K4002	885	802	618	479	362	232	250	147	161	98

①σ_{800}；②760℃；③816℃；④750℃；⑤850℃。

直到 20 世纪 60 年代中期，对镍基铸造高温合金尚未普遍采用热处理技术，很多合金铸件是在铸态使用。随着较快冷速的模壳的使用，以及合金中 γ′相体积分数的增多，就要求通过热处理来实现显微组织的最佳化，并减少性能的分散性，于是，热处理成为调控合金组织性能的重要工艺方法。镍基铸造高温合金的热处理主要包括均匀化、固溶时效、消除内应力退火。其标准热处理制度见表 5.3-14。

表 5.3-14 镍基铸造高温合金的标准热处理制度

合金牌号	标准热处理制度
K403	1 210℃，4 h，空冷；也可铸态使用
K405	铸态使用
K406	980℃，5 h，空冷
K409	1 080℃，4 h，空冷 + 900℃，10 h，空冷。也可铸态使用
K417	铸态使用
K417G	铸态使用
K418	1 180℃，2 h，空冷 + 930℃，16 h，空冷。也可铸态使用
K418B	1 180℃，2 h 空冷，或铸态使用
K419	铸态使用
K423	1 190℃，15 min，炉冷（≤45 min）至 1 000℃，空冷。也可铸态使用
K423A	1 190℃，15 min，炉冷（≤45 min）至 1 000℃，炉冷。也可铸态使用
K424	1 210℃ ± 10℃，4 h，空冷。或铸态使用
K441	1 100℃，2 ~ 2.5 h，炉冷至 900℃，空冷
K477	1 160℃，2 h，炉冷至 1 080℃，空冷 + 760℃，16 h，空冷
K4002	870℃，16 h，空冷

3.2 定向凝固镍基铸造高温合金

由于高温合金在长时间工作下，合金的高温蠕变和热疲劳破坏通常是在垂直于主应力方向的横向晶界处开始，因此，消除等轴晶垂直于主应力方向的晶界，必然提高合金的工作寿命。于是，20 世纪 60 年代中期，美国 P&W 公司发明了定向凝固技术，并应用于镍基高温合金，从此发明了一类新型的定向凝固高温合金。由于定向凝固的高温合金完全是定向排列的柱状晶，消除了垂直于应力轴的横向晶界，所以合金的蠕变强度、塑性及热疲劳性能都获得了很大的提高。从能够承受的工作温度考察，其工作温度比相应等轴晶合金提高了约 50℃。

定向凝固合金铸件的生产，是将合金熔体浇入温度高于合金熔点的铸型内，铸型底部有水冷底盘，在整个凝固过程中是从垂直于固 - 液界面方向的单一方向散热的，同时固 - 液界面前沿总保持正温度梯度，从而除了在铸型底部水冷底盘开始结晶的晶粒不断长大外，凝固过程中不再有其他晶粒形核。因为面心立方镍合金的晶体生长方向是〈100〉择优取向的，所以在开始随机取向形核的晶核长大时，也具有〈100〉取向的择优长大，而其他取向的晶核长大被抑制，最后形成由〈100〉取向的柱状晶。

定向凝固镍基高温合金的成分，开始都是采用等轴晶镍基合金成分，这是第一代定向凝固镍基高温合金，随后通过成分调整，发展了高温性能更好的第二代、第三代定向凝固镍基高温合金。

3.2.1 定向凝固镍基高温合金的牌号与成分

我国已仿制和自行研制了近10个牌号的定向凝固镍基高温合金，其牌号与化学成分如表5.3-15。

表 5.3-15 我国定向凝固镍基高温合金的牌号与化学成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%											
	C	Ni	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Fe	B	Zr	其他
DZ4	0.10～0.16	余量	9.0～10.0	5.5～6.0	5.1～5.8	3.5～4.2	5.6～6.4	1.6～2.2	≤2.0	0.012～0.025	≤0.02	
DZ5	0.07～0.15	余量	9.5～11.0	9.5～10.5	4.5～5.5	3.5～4.2	5.0～6.0	2.0～3.0	—	0.010～0.020	≤0.10	
DZ17G	0.13～0.22	余量	8.5～9.5	9.0～11.0	—	2.5～3.5	4.8～5.7	4.1～4.7	≤0.5	0.012～0.024	—	V 0.6～0.9
DZ22	0.12～0.16	余量	8.0～10.0	9.0～11.0	11.5～12.5	—	4.75～5.25	1.75～2.25	≤0.35	0.01～0.02	≤0.10	Hf1.0～2.0 Nb0.75～1.25
DZ22B	0.12～0.16	余量	8.0～10.0	9.0～11.0	11.5～12.5	—	4.75～5.25	1.75～2.25	≤0.25	0.01～0.02	≤0.12	Hf0.8～1.1 Nb0.75～1.25
DZ38G	0.08～0.14	余量	15.5～16.4	8.0～9.0	2.4～2.8	1.5～2.0	3.5～4.3	3.5～4.3	—	0.005～0.015	—	Nb0.4～1.0 Ta1.5～2.0
DZ125	0.07～0.12	余量	8.4～9.4	9.5～10.5	6.5～7.5	1.5～2.5	4.8～5.4	0.7～1.2	≤0.30	0.01～0.02	≤0.08	Hf1.2～1.8 Ta3.5～4.1
DZ125L	0.06～0.14	余量	8.2～9.8	9.2～10.8	6.20～7.80	1.5～2.5	4.3～5.3	2.0～3.2	≤0.30	0.005～0.015	≤0.05	Ta3.3～4.0

3.2.2 定向凝固镍基高温合金的力学性能

技术标准规定的定向凝固镍基高温合金的拉伸性能和持久性能见表5.3-16。

表 5.3-16 技术标准规定的定向凝固镍基高温合金的拉伸性能与持久性能

合金牌号	拉伸性能				持久性能			
	温度/℃	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ_5/%	断面收缩率 ψ/%	温度/℃	应力 σ/MPa	断裂时间/h	伸长率 δ_5/%
		≥	≥	≥			≥	≥
DZ4	900	735	6	8	760 900 950	725 315 235	100 100 55	— — —
DZ5	室温	930	6	8	750 950	685 225	120 80	7 10
DZ17G	900	700	6	8	760 980	725 216	48 24	— —
DZ22	室温	980	5	5	760 980	690 220	48 32	4 10
DZ22B	850	1 010	16	16	982	220	32	10
DZ38G	800	784	8	10	700 800	784 422	100 60	— —
DZ125	室温	980	5	5	760 980	725 235	48 32	4 10
DZ125L	室温	980	5	5	760 980	725 235	48 32	4 10

定向凝固镍基高温合金在不同温度的持久强度见表5.3-17。

表 5.3-17 定向凝固镍基高温合金的持久强度

合金牌号	持久强度/MPa													
	700℃		750℃		800℃		850℃		900℃		950℃		1 000℃	
	σ_{100}	$\sigma_{1\,000}$	σ_{100}	$\sigma_{1\,000}$	σ_{100}	$\sigma_{1\,000}$	σ_{100}	$\sigma_{1\,000}$	σ_{100}	$\sigma_{1\,000}$	σ_{100}	$\sigma_{1\,000}$	σ_{100}	$\sigma_{1\,000}$
DZ4	912	—	804①	677①	677	578	520	—	353	274	245	171	181	125
DZ5	916	—	755①		627	—	510	—	333	—	235	—	176	—
DZ17G	—	—	725①	605①	—	—	—	—	340	235	185②	110②	—	—
DZ22	934	772	804①	686①	653	478	530	392	375	247	255	—	181	109
DZ22B	—	—	793①	629①	—	—	506	368	—	—	217	135	135③	77.7③
DZ38G	863	765	706	620	569	480	456	350	334	245	235	135	142	—
DZ125	—	—	815①	672①	—	—	522	394	—	—	218②	144②	138③	84③
DZ125L	—	—	864①	744①	727	579	569	424	421	298	301	206	211	143

①760℃；②980℃；③1040℃。

3.2.3　定向凝固镍基高温合金的热处理制度

定向凝固镍基高温合金都是沉淀强化型合金，其标准热处理制度见表5.3-18。

表5.3-18　定向凝固镍基高温合金的标准热处理制度

合金牌号	标准热处理制度
DZ4	1 220℃，4 h，空冷+870℃，32 h，空冷
DZ5	1210℃，4 h，空冷+870℃，32 h，空冷
DZ17G	1 220℃，4 h，空冷+980℃，16 h，空冷
DZ22	1 210℃，2 h，空冷+870℃，32 h，空冷
DZ22B	1 175℃，0.5 h+1 205℃，2 h，空冷+1 080℃，4 h，空冷+870℃，32 h，空冷
DZ38G	1 190℃，2 h，空冷+1 090℃，2 h空冷+850℃，2 h，空冷
DZ125	1 180℃，2 h+1 230℃，3 h，空冷+1 100℃，4 h，空冷+870℃，20 h，空冷
DZ125L	1 220℃，2 h，空冷+1 080℃，4 h，空冷+900℃，16 h，空冷

3.3　单晶镍基高温合金

在定向凝固柱状晶高温合金的基础上，进一步发展就出现了完全消除晶界的单晶高温合金。单晶高温合金的热强性能比定向凝固合金又有很大提高，其工作温度提高了28~50℃，因此单晶高温合金得到了迅速发展，自20世纪80年代以来，相继出现了第二代、第三代、第四代单晶高温合金。

3.3.1　单晶镍基高温合金的牌号与化学成分

单晶镍基高温合金的成分特点是：在铸造合金的基础上，去除或减少晶界强化元素C、B、Zr、Hf等的含量；以Ta代替部分W，获得较好的单晶铸造性能；添加一定量的Re改善合金性能；同时保证Co的固溶强化和高积分数γ′相的沉淀强化。

我国从20世纪80年代初开初研制单晶镍基高温合金，目前已有几个相当于国外第一代、第二代的牌号获得应用。我国单晶镍基高温合金的牌号和成分见表5.3-19。

3.3.2　单晶镍基高温合金的力学性能

技术标准规定的拉伸性能和持久性能见表5.3-20，在不同温度下的持久强度见表5.3-21。

表5.3-19　我国单晶镍基高温合金的牌号与化学成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%													
	C	Ni	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	Ta	Fe	B	Zr	其他
DD3	≤0.01	余量	9.0~10.0	4.5~5.5	5.0~6.0	3.5~4.5	5.5~6.2	1.7~2.4	—	—	≤0.5	≤0.005	≤0.007	
DD4	≤0.01	余量	8.5~9.5	7.0~8.0	5.5~6.5	1.4~2.0	3.4~4.0	3.9~4.7	0.35~0.70	3.5~4.8	≤0.5	≤0.01	≤0.05	
DD6	0.001~0.04	余量	3.8~4.8	8.5~9.5	7.0~9.0	1.5~2.5	5.2~6.2	≤0.10	0~1.2	6.0~8.5	≤0.3	≤0.02	≤0.01	Re 1.6~2.4 Hf 0.05~0.15
DD8	≤0.03	余量	15.5~16.5	8.0~9.0	5.6~6.4	—	3.6~4.2	3.6~4.2	—	0.7~1.2	≤0.5	≤0.005	≤0.007	
DD402	≤0.006	余量	7.0~8.2	4.3~4.9	7.6~8.4	0.3~0.7	5.45~5.75	0.8~1.2	≤0.15	5.8~6.2	≤0.2	≤0.003		

表5.3-20　单晶镍基高温合金的拉伸性能和持久性能

合金牌号	拉伸性能					持久性能		
	温度/℃	抗拉强度 σ_b/MPa ≥	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa ≥	伸长率 δ_5/% ≥	断面收缩率 ψ/% ≥	温度/℃	应力 σ/MPa	断裂时间/h ≥
DD3	760 900	1 030 835	— —	3 6	3 6	760 1 000 1 040	785 195 165	70 70 70
DD4	760	850	—	8	8	760 1 040	800 145	50 70
DD6	室温 760 980	880 1 000 700	800 850 600	8 5 18	12 6 22	980 1 070 1 100	250 140 130	100 100 100
DD8	—	—	—	—	—	850	480	100
DD402	760	980	900	5	—	760 980	780 260	30 30

表 5.3-21 单晶镍基高温合金的持久强度

合金牌号	持久强度/MPa															
	700℃		760℃		800℃		850℃		900℃		950℃		1 000℃		1 040℃	
	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{100}	σ_{1000}
DD3	981	878	814	696	706	530	513	394	368	237	270	196	201	147	177	140
DD4	—	—	853	—	709	—	551	—	415	—	303	—	215	—	161	—
DD6	—	—	807	—	—	—	580	—	—	—	303①	—	179②	—	148③	—
DD8	952	822	818④	664④	660	490	500	332	385	220	260	144	180	96	—	—
DD402	—	—	859	745	—	—	574	428	—	—	326	187	—	—	166⑤	103⑤

①980℃；②1 070℃；③1 100℃；④750℃；⑤1 050℃。

3.3.3 单晶镍基高温合金的工艺性能

单晶镍基高温合金的铸造成型性能良好，可真空钎焊或扩散连接焊，热处理对合金组织性能有显著影响，固溶处理可完全溶解铸态的γ/γ′共晶组织，并减少枝晶偏析，时效处理可获得最佳尺寸的γ′相。其标准热处理工艺见表5.3-22。

表 5.3-22 单晶镍基高温合金的标准热处理制度

合金牌号	标准热处理制度
DD3	1 250℃，4 h，空冷+870℃，32 h，空冷
DD4	1 260℃，2 h，风冷+1 080℃，4 h，空冷+900℃，16 h，空冷
DD6	1 290℃，1 h+1 300℃，2 h+1 315℃，4 h，空冷+1 120℃，4 h，空冷+870℃，32 h，空冷
DD8	1 100℃，8 h，空冷+1 240℃，4 h，空冷+1 090℃，2 h，空冷+850℃，24 h，空冷
DD402	1 315℃，3 h，空冷+1 080℃，6 h，空冷+870℃，20 h，空冷

3.4 定向凝固镍基共晶高温合金简介

当合金成分处于共晶成分时，可以通过控制凝固条件，使共晶成分合金的两相都沿散热方向形成定向、规则、连续排列，从而制得一种新型的定向凝固共晶合金。这种合金也可称为“自生复合”的金属基复合材料。这种自生复合材料可以一次从熔体直接制成所需要的部件。根据不同的需要，选择不同的共晶系列，可以获得具有特殊性能的金属基复合材料。目前美、俄、法等国已研制成功几种定向凝固镍基共晶高温合金，如俄罗斯牌号为ВКЛС-10、КВЛС-20、КВЛС-20Р、法国牌号为COTAC-74、COTAC-744、COTAC-784，这些合金除含有较高的形成γ′相的Al（4%～6%）以外，还含有很高的Nb（4%左右）和0.4%～0.6%C，合金定向凝固后形成γ/γ′-NbC共晶自生复合材料，美国牌号NITAC-13、NITAC-14B、INTAC-3-116A、NITAC-C，这些合金中含有5.5%～6.5% Al，8%～10%Ta，0.3%～0.5%C，合金定向凝固后，形成γ/γ′-TaC共晶复合材料。

定向凝固共晶镍基高温合金的工作温度比单晶镍基合金的工作温度高50～75℃，而且有满意的抗高温氧化和热疲劳性能。

我国对定向凝固共晶镍基高温合金的研制还处于起步阶段，取得了一些初步成果，要走上生产应用尚有大量工作要做。

4 粉末冶金镍基高温合金简介

随着现代航空发动机推重比的提高，对高温合金的工作温度和性能也提出了更高的要求。由铸锭冶金方法生产的高温合金，由于合金化程度的提高，铸锭的偏析严重、热加工性能差、很难成形，所以想要进一步提高工作温度和性能，变得十分困难。而粉末冶金工艺，在制粉过程中采用了喷雾制粉、旋转电极制粉、离心雾化制粉等，使合金熔体都实现了快速凝固，因而成分均匀，基本上消除了偏析，且晶粒细小，制备的合金热加工性能好。故此粉末冶金工艺可生产高合金化的、成分组织均匀的新型高温合金，其性能比铸锭冶金方法生产的合金显著提高。

粉末冶金镍基高温合金主要有两类，一类是蜗轮盘用粉末高温合金，另一类为叶片用弥散强化粉末高温合金。美、俄两国在这一领域处于领先地位，我国于20世纪80年代初仿照国外牌号开始研制，已获得重要进展。

4.1 蜗轮盘用粉末冶金镍基高温合金

美、俄两国已成功研制生产、并广泛应用的蜗轮盘用粉末冶金镍基高温合金的牌号与成分见表5.3-23。

表 5.3-23 蜗轮盘用粉末冶金镍基高温合金的牌号与成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%										
	C	Ni	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Nb	B	Zr	其他
IN100	0.07	余量	12.4	16.5	3.2	—	5.0	4.3	—	0.02	0.06	V 0.06
LCAstroloy	0.023	余量	15.1	17.0	5.2	—	4.0	3.5	—	0.024	<0.01	—
MERL76	0.025	余量	12.2	18.2	3.2	—	5.0	4.3	1.3	0.02	0.06	Hf 0.3
René95	0.08	余量	12.8	8.1	3.6	3.6	3.6	2.6	3.6	0.01	0.053	—
René88DT	0.03	余量	16.0	13.0	4.0	4.0	2.1	3.7	0.7	0.015	0.05	—
N18	0.015	余量	11.5	15.7	6.5	—	4.35	4.35	—	0.015	—	Hf 0.45
U720	0.025	余量	16.0	15.2	3.0	1.25	2.5	5.0	—	0.018	0.03	—
ЭП741НП	0.05	余量	9.0	16.0	3.7	5.3	5.0	1.8	2.6	≤0.015	≤0.015	Hf 0.25

粉末冶金镍基高温合金的力学性能与固结成形工艺和热处理制度有关，但普遍都高于单晶合金。例如 René 合金在不同工艺条件下的力学性能见表 5.3-24。

4.2 氧化物弥散强化镍基高温合金

氧化物弥散强化合金是将纳米级的微细氧化物颗粒，均匀弥散地分布在合金基体而达到弥散强化的目的。作为弥散强化相氧化物要求熔点高、弹性模量大、热稳定性和化学稳定性非常好、不与基体发生反应。这种超细、弥散、均匀分布的硬质点的强化作用可以保持到接近合金熔点的温度。最初氧化弥散强化镍基合金的弥散相是 ThO_2，因其有放射性而被淘汰。现在通常是选用 Y_2O_3 作为弥散相。

弥散强化合金的生产工艺流程是粉末制备—固结成形—热加工—热处理。关键工艺是纳米级氧化物颗粒均匀分布的粉末制备。目前制备这种混合粉末的最有效的方法是机械合金化。美国研制生产的几种典型的氧化物弥散强化镍基高温合金的牌号与化学成分见表 5.3-25。

三种典型的氧化物弥散强化高温合金在不同温度下的拉伸性能和持久强度见表 5.3-26。

表 5.3-24 不同成型工艺和热处理制度的 René95 合金的拉伸性能

成形工艺	热处理制度	晶粒度 ASTM	室温拉伸性能				650℃拉伸性能			
			抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ_5/%	断面收缩率 ψ/%	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ_5/%	断面收缩率 ψ/%
热挤压+锻造	1 120℃，1 h，空冷+760℃，8 h空冷	11	1 560	1 140	8.6	19.6	1 500	1 140	12.4	16.2
热等静压	1 120℃，1 h，空冷+760℃，8 h，空冷	8	1 560	1 120	16.6	19.1	1 500	1 100	13.8	13.4
铸、锻工艺	1 220℃，1 h，空冷+1 120℃，1 h空冷+760℃，8 h，空冷	3.6	1 210	940	8.6	14.3	1 250	930	9.0	13.6

表 5.3-25 美国几种典型的氧化物弥散强化镍基高温合金的牌号与成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%											
	C	Ni	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Ta	Y_2O_3	B	Zr
MA754	0.05	余量	20	—	—	—	0.3	0.5	—	0.6	—	—
MA758	0.05	余量	30	—	—	—	0.3	0.5	—	0.6	—	—
MA6000	0.05	余量	15	2.0	2.0	4.0	4.5	2.5	2.0	1.1	0.1	0.15
MA760	0.05	余量	20	—	2.0	3.5	6.0	—	—	0.95	0.01	0.95

表 5.3-26 三种氧化物弥散强化高温合金在不同温度下的拉伸和持久性能

合金	室温拉伸性能			540℃拉伸性能			1 095℃拉伸性能						1 000 h持久强度/MPa	
	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	抗力强度 σ_b/MPa		屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa		伸长率 δ/%			
							纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	650℃	980℃
MA754	965	585	21	760	515	19	148	131	134	121	12.5	3.5	255	130
MA956	645	555	10	370	285	20	91	90	84.8	82.7	3.5	4.0	110①	65
MA6000	1295	1285	4	1 155	1 010	6	222	177	192	170	9.0	2.0	—	185

① 760℃性能。

注：1. MA754 合金为棒材，经 1 315℃，1 h，空冷的热处理。
2. MA956 合金为板材，经 1 300℃，1 h，空冷的热处理。
3. MA6000 合金为棒材，经 1 230℃，0.5 h，空冷+955℃，2 h，空冷+845℃，24 h，空冷的热处理。

5 民用镍基高温合金

镍基高温合金主要应用于航空发动机热端部件，另一类重要应用领域是地面发电的燃气涡轮发动机。此外，内燃机增压涡轮、烟气轮机叶片和轮盘的应用也日益广泛，而且工业燃气轮机发电装置用高温合金的增长速度超过了航空发动机。

工业燃气轮机等民用高温合金的工作环境与航空发动机相比有很大差别，热腐蚀是一个突出的问题，要求材料的工作寿命也大大增加。另外，部件的尺寸也相差很大，如地面燃气轮机的叶片尺寸是航空发动机的 2～3 倍，可以说民用高温合金的工作条件更为恶劣、苛刻。以下简要介绍工业燃气轮机用耐热腐蚀镍基高温合金，内燃机增压器涡轮、阀座及离心玻璃棉离心器用镍基合金。

5.1 工业燃气轮机用耐热腐蚀镍基高温合金

工业燃气轮机由于使用的燃料质量差（含硫高），加之在海洋含盐环境下燃烧而产生的硫酸盐将沉积在部件表面，

引起对金属氧化腐蚀速度大大增加，同时又要求长时间的工作寿命（100 000 h以上），因此要求高温合金既具有较高的高温强度，又必须具有优良的抗热腐蚀性能以及长时间的组织稳定性。在合金的成分设计上应注意考虑这些特点。

试验表明Ta对合金的耐热腐蚀性能有良好的作用，所以合金中都含有较多的Ta；Cr是保证合金耐热腐蚀性的关键元素，一般Cr含量愈高耐热腐蚀性愈好；Mo含量超过3.5%对耐热腐蚀有害。我国根据资源情况，研制了不含Ta、或Ta含量较少，而Cr含量较高的工业燃气轮机用耐热腐蚀的镍基高温合金。

工业燃气轮机用耐热腐蚀高温合金，主要是镍基铸造高温合金，国外及中国一些典型的合金牌号和化学成分见表5.3-27和表5.3-28。

表5.3-27　国外几种典型的燃气轮机用耐热腐蚀镍基高温合金的牌号与成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%												
	C	Ni	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Ta	B	Zr	Hf	其他
IN738LC	0.11	余量	16	8.5	2.6	1.7	3.4	1.7	1.7	0.01	0.05	—	Nb 0.9
GTD111	0.10	余量	14	9.5	3.8	1.5	3.0	4.9	2.8	0.01	—	—	
IN792	0.21	余量	12.4	9.0	3.8	1.9	3.1	4.5	3.9	0.01	0.1	—	
GTD222	0.10	余量	22.5	19	2.0	—	1.2	2.3	1.0	0.008	—	—	Nb 0.8
DSGTD111	0.10	余量	14	9.4	3.7	1.5	3.0	5.0	3.0	0.01	0.01	0.15	
PWA1483	0.07	余量	12.2	9.0	3.8	1.9	3.6	4.1	5.0	—	—	—	
CMSX-11B	—	余量	12.5	7.0	5.0	0.5	3.6	4.2	5.0	—	—	0.04	Nb 0.1
CMSX-11C	—	余量	14.9	3.0	4.5	0.4	3.4	4.2	5.0	—	—	0.04	Nb 0.1

表5.3-28　中国燃气轮机用耐热腐蚀镍基铸造高温合金的牌号与分成

合金牌号	化学成分（质量分数）/%											
	C	Ni	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	Ta	B	Zr
K438	0.15	余量	16.0	8.5	2.6	1.8	3.5	3.3	0.8	1.75	0.01	0.1
K438G	0.17	余量	15.8	8.5	2.6	1.7	4.0	3.6	0.7	1.7	0.01	—
K480	0.17	余量	14.0	9.5	4.0	4.0	3.0	5.0	—	—	0.015	0.06
K4537	0.10	余量	15.5	9.5	5.0	1.5	3.0	3.5	2.0	—	0.015	0.05
DZ38G	0.11	余量	16.0	8.5	2.6	1.75	3.9	3.9	0.7	1.75	0.01	—
DD8	<0.03	余量	15.0	8.5	6.0	—	3.9	3.9	—	1.0	≤0.005	≤0.007

工业燃气轮机叶片的工作温度也在逐年提高，到20世纪80年代末，美国GE公司制成的大型机组，其燃气涡轮的进口温度达1 315℃，因此所用高温合金除考虑耐热腐蚀性能外，高温强度成为关键指标，在航空发动机领域应用的定向凝固技术和单晶合金，也在工业燃气轮机的叶片等零件上得到应用。表5.3-27中的DSGTD111合金就是定向凝固合金，PWA1483、CMSX-11B、CMSX-11C都是单晶合金。我国牌号DZ38G、DD8也分别是定向凝固合金和单晶合金。

工业燃气轮机用耐热腐蚀镍基高温合金的力学性能见表5.3-29。

表5.3-29　耐热腐蚀镍基高温合金的持久性能和持久强度

合金牌号	技术条件规定的持久性能			持久强度/MPa					
				700℃		900℃		1 000℃	
	温度/℃	应力 σ /MPa	断裂时间/h ≥	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{100}	σ_{1000}
K438	850	363	50	726	628	265	177	—	—
K438G	850	420	40	800	686	299	201	135	84
K4537	850	363	50	726	637	265	177	108	—
K480	980	193	23	755	—	343 (870℃)	245 (870℃)	167 (980℃)	—
DZ38G	800	422	60	863	765	333	245	142	—
DD8	850	480	100	952	822	385	220	180	96

5.2　内燃机增压涡轮及阀座用镍基高温合金

5.2.1　柴油机增压涡轮用镍基高温合金

柴油机废气增压技术，是利用汽缸排出的废气驱动涡轮，带动压气机叶片，增加空气压力，从而增加进气量，强化燃烧，可以大幅度提高柴油机的功率，降低油耗，减少污染。涡轮是增压器的关键部件，通常工作温度为550～850℃，转速每分钟3万转以上，工作寿命要求上万小时。增压器涡轮是铸造高温合金，用精密铸造工艺生产。我国根据增压涡轮工作温度的不同，开发了铁基（K213）、镍基（K418、K491）几种增压涡轮用高温合金，广泛应用于坦克、舰船、大型运输车辆、冶金矿山、石油钻机等领域的柴油机。

5.2.2　内燃机阀座用镍基高温合金

内燃机的进气阀座和排气阀座是承受汽缸的进气阀与排气阀不断的高速冲击、并要相互严密匹配以保持汽缸的密封性、同时还要向缸盖散热的重要部件。尤其是排气阀座的工作环境相当恶劣，阀座的表面温度大约为600～700℃，和排气阀接触面的温度甚至接近900℃，在此高温下要承受阀门在关闭运动时的冲击载荷和燃气压力的静载荷的作用；还要承受高速燃气气流的冲刷和热腐蚀（燃气中含有硫化物、铅盐和V_2O_5等）；另外阀在阀座上高速冲击跳动、滑动等运动中会产生复杂的机械磨损，因此，对阀座材料的要求也十分苛刻。它不仅要具有良好的高温强度、硬度、抗高温气化、耐热腐蚀，同时还要求具有良好的抗热疲劳和抗机械磨损性能。目前汽车内燃机阀座材料主要是铁基或镍基铸造高温合金。我国用精密铸造工艺生产的阀座用镍基高温合金的成分见表5.3-30。

表5.3-30　我国汽车内燃机阀座用镍基高温合金的牌号与成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%							
	C	Ni	Cr	Fe	Co	W	Mo	Si
G5-IN	2.4	余量	29.0	<8.0	10.0	15.0	—	1.95
NH	1.5	余量	26.5	12.5	10.0	9.5	10.0	—

5.3　喷吹离心玻璃棉的离心器用镍基高温合金

玻璃棉具有质量小、隔热、保温、消音、防火性能优良等特点，是一种理想的隔热、隔音、保温、防火材料，广泛应用于建筑、汽车、铁路车辆、冷冻设备等行业。离心棉的生产是将温度1 300℃左右的熔融玻璃股流入圆周侧壁上有数千个直径1～2 mm小孔的离心器，离心器以2 000～

3 000 r/min的转速旋转，熔融玻璃在离心力作用下从离心器小孔中甩出，再通过离心器外围的环形燃烧室产生的高温燃气高速喷吹，将熔融玻璃喷吹成直径 5~7 μm 的定长玻璃纤维，即成玻璃棉。离心器是生产玻璃棉的关键部件，工作环境十分恶劣。制作离心器的材料不仅要求有较高的高温强度，而且要求能耐熔融玻璃流股的高速冲刷和热腐蚀。美、日、法、德等国都采用专用的镍基或钴基铸造高温合金。我国于 1982 年首次研制成功直径为 200 mm 的镍基高温合金离心器，1989 年又研制成功直径为 300 mm 的离心器，其使用寿命达到国外产品水平，实现了离心器的国产化。我国和国外离心器高温合金的化学成分见表 5.3-31。

表 5.3-31 我国和国外离心器用镍基高温合金的化学成分

国别	化学成分（质量分数）/%										
	C	Ni	Cr	Fe	Co	W	Mo	Si	Mn	B	其他
美国	0.35	余量	34.5	—	—	8.0	—	0.85	0.2	—	Ta0.8
日本	0.07	余量	27.5	1.0	—	5.5	—	0.65	0.55	—	Nb0.95 Ti0.15 Hf0.13
德国	0.75	余量	25.0	<5.0	10	6.0	2.8	1.05	0.75	—	Ta 1.75
法国	0.50	余量	30.0	—	—	5.0	—	—	—	0.1	Zr0.25 Ta 4.5
中国	0.40~0.60	余量	27.5~30.0	8.5~10.5	—	5.0~8.0	—	1.0~2.5	1.0~2.5	0.10~0.30	—

6 Ni_3Al 基高温合金

在 Ni-Al 二元系的几个金属间化合物中，Ni_3Al 和 NiAl 是两种具有应用开发前景的高温结构材料，其中 Ni_3Al 基高温合金已有几个牌号获得了工业应用。

Ni_3Al 是镍基高温合金中最主要的强化相，称为 γ′ 相，它是目前研究得最多最深入的金属间化合物之一。Ni_3Al 有一个最重要的特性，就是在室温至 750℃之间，其流变应力随温度的升高而增加，经过合金化以后达到最大流变应力的温度还可提高至 800~900℃，只有在更高的温度下才发生通常的软化现象。这一反常规律使 Ni_3Al 基合金作为高温结构材料具有极大的吸引力。特别是 1979 年 Aoki 和 Izumi 用添加微量硼使 Ni_3Al 的室温脆性获得大大改善以后，Ni_3Al 基合金的研究和实用化发展十分迅速，目前已开发出添加 B、Cr、Mo、Ti、Zr、Hf 等元素的 Ni_3Al 基系列合金，其化学成分见表 5.3-32。

表 5.3-32 Ni_3Al 基高温合金的牌号与化学成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%							
	Ni	Al	Cr	Mo	Ti	Zr	Mn	B
IC-221	余量	8.5	7.8	—	—	1.7	—	0.02
IC-218	余量	8.7	8.1	—	—	0.2	—	0.02
IC-221M	余量	8.0	7.7	1.4	—	1.7	—	0.008
IC396M	余量	8.0	7.8	3.0	—	0.85	—	0.005
IC-50	余量	11.3	—	—	—	0.6	—	0.02
MX-246	余量	8.5	7.8	—	0.9	1.7	0.5	0.1

这些合金的高温力学性能优良，以 IC-221 合金为例，其拉伸性能见表 5.3-33。

表 5.3-33 IC-221 合金的拉伸性能

温度/℃	拉伸性能		
	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%
室温	1 700	700	30
600	1 300	930	28
870	940	830	17

这些合金可以用来制作铸造高温部件，也可以冷加工成板材。

我国还研制了两种定向凝固 Ni_3Al 基高温合金，其成分见表 5.3-34。

表 5.3-34 Ni_3Al 基定向凝固高温合金的牌号与化学成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%								
	C	Ni	Al	Mo	Fe	Mn	Si	B	Y
IC6	≤0.02	余量	7.4~8.0	13.5~14.3	≤1.0	≤0.5	≤0.5	0.02~0.06	—
IC6A	≤0.02	余量	7.4~8.0	13.5~14.3	≤1.0	≤0.5	≤0.5	0.02~0.06	0.01~0.05

IC6 及 IC6A 两合金的拉伸性能及持久性能见表 5.3-35。

表 5.3-35 IC6、IC6A 合金的拉伸性能及持久性能

合金牌号	拉伸性能					持久性能		
	温度/℃	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	断面收缩率 ψ/%	温度/℃	应力 σ/MPa	断裂时间/h≥
IC6	20	1 140	815	15	16.5	900	350	180
	700	1 090	995	8.5	21.0	1 100	90	100
	760	1 180	1 100	6.5	17.0			
	800	1 280	1 240	1.6	4.5			
	850	1 110	1 040	3.0	7.5			
	900	1 000	925	4.0	9.5			
	950	840	765	10.0	22.0			
	1 000	720	640	25.0	32.0			
IC6A	20	1 095	738	13.0	16.0	760	750	229
	760	1 030	1 013	6.0	13.0	900	350	157
	900	950	900	—	—	1 000	170	119
						1 100	100	205

编写：唐仁政（中南大学）
审稿：田荣璋（中南大学）

第4章　镍基电阻合金

1　概述

电阻合金是以其电阻特性为主要技术指标的合金，一般要求它具有较大的电阻率，电阻值稳定，电阻温度系数小，同时加工性能好，可加工成丝材、带材、棒材和盘条等。

电阻合金是用来制作电子仪器和测量仪表以及其他工业装置中的电阻元件、发热器（如工业用电炉以及各种电热器）用的发热体元件的一种基础材料。

电阻合金可以按合金体系、功能特性和用途等进行分类。

按合金体系分有：Cu－Mn系、Cu－Ni系、Ag－Mn系、Ni－Cr系、Ni－Mo系、Ni－Mn系和Fe－Cr－Al系。本章只介绍镍基电阻合金系。Fe－Cr－Al系电阻合金是目前应用十分普遍的电阻合金，在本大典的第3卷中有详细介绍。

按功能特性分有：利用电热转换功能的发热体电阻合金，利用电阻值恒定不变的精密电阻合金，利用电阻值随环境而变化的应变电阻合金、热敏电阻合金等。

按用途分有：①调节器用电阻合金。主要用于起动电阻、滑动电阻、电动机速度控制、电路温度控制以及电压调节等方面。②精密仪器仪表用电阻合金。主要用于电桥、电位差计、标准电阻、分流器等方面。③电位器用电阻合金。④传感器用电阻合金。⑤加热器的发热体用电阻合金等。

电阻合金一般为单相固溶体。合金元素含量越高，合金的电阻率越高，在连续固溶体中，当合金元素含量为50%（摩尔分数）时，合金的电阻值最大，同时电阻温度系数也最小。

2　镍基高电阻电热合金

高电阻电热合金是指用于制作电加热器的发热体元件和一般的电阻元件，通常都加工成丝材、带材、棒材和盘条。

2.1　镍基高电阻电热合金的牌号与化学成分

镍基高电阻电热合金的使用已有近百年历史，美国和英国的主要品种有Ni80Cr20、Ni65Cr15Fe等。它们在高温下抗氧化，不软化、强度高，长期使用时永久伸长很少，而且电阻、高电阻温度系数小，因而获得广泛应用。

根据GB/T 1234—1995规定，我国镍基高电阻电热合金的化学成分见表5.4-1。

表5.4-1　镍基高电阻电热合金的牌号与化学成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%								
	Si	Cr	Al	Fe	Ni	C	P	S	Mn
Cr20Ni80	0.75～1.60	20.0～23.0	≤0.5	≤1.0	余量	≤0.08	≤0.020	≤0.015	≤0.60
Cr30Ni70	0.75～1.60	28.0～31.0	≤0.5	≤1.0	余量	≤0.08	≤0.020	≤0.015	≤0.60
Cr15Ni60	0.75～1.60	15.0～18.0	≤0.5	余量	55.0～61.0	≤0.08	≤0.020	≤0.015	≤0.60
Cr20Ni35	1.00～3.00	18.0～21.0	—	余量	34.0～37.0	≤0.08	≤0.020	≤0.015	≤1.00
Cr20Ni30	1.00～2.00	18.0～21.0	—	余量	30.0～34.0	≤0.08	≤0.020	≤0.015	≤1.00

表5.4-1中的成分在保证合金性能符合本章2.2、2.3小节所要求的条件下，合金成分范围可能进行适当调整，或者为改善合金性能，也允许在合金中添加适量的其他元素。表中Cr20Ni35和Cr20Ni30应为铁镍基电热合金，为便于对比，本章也将其成分性能分别列出。

2.2　镍基高电阻电热合金的物理性能

2.2.1　合金的电阻率和电阻温度系数

电阻率及电阻温度系数是电阻合金最基本的性能指标。

金属材料的电阻是随温度变化的，一般金属的温度越高，电阻越大。多数金属和合金的电阻随温度变化的特性接近于直线关系。少数合金（例如锰铜）的电阻温度关系接近抛物线。

镍基高电阻电热合金的软态丝材、带材在室温下的电阻率见表5.4-2、表5.4-3。

表5.4-2　镍基高电阻电热合金丝材的电阻率（20℃）

合金牌号	丝材直径/mm	电阻率/μΩ·m
Cr20Ni80	<0.50 0.50～3.00 >3.00	1.09±0.05 1.13±0.05 1.14±0.05
Cr30Ni70	<0.50 ≥0.50	1.18±0.05 1.20±0.05
Cr15Ni60	<0.50 ≥0.50	1.12±0.05 1.06±0.05
Cr20Ni35 Cr20Ni30	<0.50 ≥0.50	1.04±0.05 1.06±0.05

表5.4-3　镍基高电阻电热合金带材的电阻率（20℃）

合金牌号	合金带材厚度/mm	电阻率/μΩ·m
Cr20Ni80	≤0.80 >0.80～3.00 >3.00	1.09±0.05 1.13±0.05 1.14±0.05
Cr30Ni70	≤0.80 >0.80～3.00 >3.00	1.18±0.05 1.19±0.05 1.20±0.05
Cr15Ni60	≤0.80 >0.80～3.00 >3.00	1.11±0.05 1.14±0.05 1.15±0.05
Cr20Ni35 Cr20Ni30	≤0.80 >0.80	1.04±0.05 1.06±0.05

为了便于电阻元件的制作，表5.4-4列出了电阻合金丝材（直径小于1.00 mm）的每米电阻值及其允许偏差。

高电阻电热合金除电阻值有一定要求外，对电阻值的均匀性也有一定要求，对每盘丝材任意部位每米电阻均匀性偏差不超过4%，每卷冷轧带材任意部位电阻均匀性偏差不超过5%。

高电阻电热合金的电阻温度修正系数见表5.4-5。

表 5.4-4 镍基高电阻电热合金丝材每米的电阻值及允许偏差

直径/mm	每米电阻值/$\Omega \cdot m^{-1}$											
	Cr20Ni80			Cr30Ni70			Cr15Ni60			Cr20Ni35		
	中值	范围	偏差/%	中值	范围	偏差/%	中值	范围	偏差/%	中值	范围	偏差/%
0.03	1 542	1 388 ~ 1 696	±10	1 669	1 502 ~ 1 836	±10	1 584	1 426 ~ 1 742	±10	1 471	1 324 ~ 1 618	±10
0.04	867.4	780.7 ~ 954.1	±10	939.0	845.1 ~ 1 033	±10	891.3	802.2 ~ 980.4	±10	827.6	744.8 ~ 910.4	±10
0.05	555.1	499.6 ~ 610.6	±10	601.0	540.9 ~ 661.1	±10	570.4	513.4 ~ 627.4	±10	529.7	476.7 ~ 582.7	±10
0.06	385.5	347.0 ~ 424.1	±10	417.3	375.6 ~ 459.0	±10	396.1	356.5 ~ 435.7	±10	367.8	331.0 ~ 404.6	±10
0.07	283.2	260.5 ~ 305.9	±8	306.6	282.1 ~ 331.1	±8	291.0	267.7 ~ 314.3	±8	270.2	248.6 ~ 291.8	±8
0.08	216.8	199.5 ~ 234.1	±8	234.8	216.0 ~ 253.6	±8	222.8	205.0 ~ 240.6	±8	206.9	190.3 ~ 223.5	±8
0.09	171.3	157.6 ~ 185.0	±8	185.5	170.7 ~ 200.3	±8	176.1	162.0 ~ 190.2	±8	163.5	150.4 ~ 176.6	±8
0.10	138.8	127.7 ~ 149.9	±8	150.2	138.2 ~ 162.2	±8	142.6	131.2 ~ 154.0	±8	132.4	121.8 ~ 143.0	±8
0.11	114.7	105.5 ~ 123.9	±8	124.2	114.3 ~ 134.1	±8	117.9	108.5 ~ 127.3	±8	109.4	100.6 ~ 118.2	±8
0.12	96.38	88.67 ~ 104.1	±8	104.3	95.96 ~ 112.6	±8	99.03	91.11 ~ 107.0	±8	91.96	84.60 ~ 99.32	±8
0.13	82.12	76.37 ~ 87.87	±7	88.90	82.68 ~ 95.12	±7	84.38	78.47 ~ 90.29	±7	78.35	72.87 ~ 83.83	±7
0.14	70.81	65.85 ~ 75.77	±7	76.65	71.28 ~ 82.02	±7	72.76	67.67 ~ 77.85	±7	67.56	62.83 ~ 72.29	±7
0.15	61.68	57.36 ~ 66.00	±7	66.77	62.10 ~ 71.44	±7	63.38	58.94 ~ 67.82	±7	58.85	54.73 ~ 62.97	±7
0.16	54.21	50.42 ~ 58.00	±7	58.69	54.58 ~ 62.80	±7	55.70	51.80 ~ 59.60	±7	51.73	48.11 ~ 55.35	±7
0.17	48.02	44.66 ~ 51.38	±7	51.99	48.35 ~ 55.63	±7	49.34	45.89 ~ 52.79	±7	45.82	42.61 ~ 49.03	±7
0.18	42.83	40.26 ~ 45.40	±6	46.37	43.59 ~ 49.15	±6	44.01	41.37 ~ 46.65	±6	40.87	38.42 ~ 43.32	±6
0.19	38.44	36.13 ~ 40.75	±6	41.62	39.12 ~ 44.12	±6	39.50	37.13 ~ 41.87	±6	36.68	34.48 ~ 38.88	±6
0.20	34.70	32.62 ~ 36.78	±6	37.56	35.31 ~ 39.81	±6	35.65	33.51 ~ 37.79	±6	33.10	31.11 ~ 35.09	±6
0.22	28.67	26.95 ~ 30.39	±6	31.04	29.18 ~ 32.90	±6	29.46	27.69 ~ 31.23	±6	27.36	25.72 ~ 29.00	±6
0.25	22.21	20.88 ~ 23.54	±6	24.04	22.60 ~ 25.48	±6	22.82	21.45 ~ 24.19	±6	21.19	19.92 ~ 22.46	±6
0.28	17.70	16.64 ~ 18.76	±6	19.16	18.01 ~ 20.31	±6	18.19	17.10 ~ 19.28	±6	16.89	15.88 ~ 17.90	±6
0.30	15.42	14.49 ~ 16.35	±6	16.69	15.69 ~ 17.69	±6	15.84	14.89 ~ 16.79	±6	14.71	13.83 ~ 15.59	±6
0.32	13.55	12.74 ~ 14.36	±6	14.67	13.79 ~ 15.55	±6	13.93	13.09 ~ 14.77	±6	12.93	12.15 ~ 13.71	±6
0.35	11.33	10.76 ~ 11.90	±5	12.26	11.65 ~ 12.87	±5	11.64	11.06 ~ 12.22	±5	10.81	10.27 ~ 11.35	±5
0.38	9.611	9.130 ~ 10.09	±5	10.40	9.880 ~ 10.92	±5	9.876	9.382 ~ 10.37	±5	9.170	8.712 ~ 9.629	±5
0.40	8.674	8.240 ~ 9.108	±5	9.390	8.921 ~ 9.860	±5	8.913	8.467 ~ 9.359	±5	8.276	7.862 ~ 8.690	±5
0.42	7.868	7.475 ~ 8.261	±5	8.517	8.091 ~ 8.943	±5	8.084	7.680 ~ 8.488	±5	7.507	7.132 ~ 7.882	±5
0.45	6.853	6.510 ~ 7.196	±5	7.419	7.048 ~ 7.790	±5	7.042	6.690 ~ 7.394	±5	6.539	6.212 ~ 6.866	±5
0.48	6.024	5.723 ~ 6.325	±5	6.521	6.195 ~ 6.847	±5	6.189	5.880 ~ 6.498	±5	5.747	5.460 ~ 6.034	±5
0.50	5.551	5.273 ~ 5.829	±5	6.010	5.710 ~ 6.311	±5	5.704	5.419 ~ 5.989	±5	5.297	5.032 ~ 5.562	±5
0.55	4.756	4.518 ~ 4.994	±5	5.051	4.798 ~ 5.304	±5	4.840	4.598 ~ 5.082	±5	4.462	4.239 ~ 4.685	±5
0.60	3.997	3.797 ~ 4.197	±5	4.244	4.032 ~ 4.456	±5	4.067	3.864 ~ 4.270	±5	3.749	3.562 ~ 3.936	±5
0.65	3.405	3.235 ~ 3.575	±5	3.616	3.435 ~ 3.797	±5	3.466	3.293 ~ 3.639	±5	3.194	3.034 ~ 3.354	±5
0.70	2.936	2.789 ~ 3.083	±5	3.118	2.962 ~ 3.274	±5	2.988	2.839 ~ 3.137	±5	2.754	2.616 ~ 2.892	±5
0.75	2.558	2.430 ~ 2.686	±5	2.716	2.580 ~ 2.852	±5	2.603	2.473 ~ 2.733	±5	2.399	2.279 ~ 2.519	±5
0.80	2.248	2.136 ~ 2.360	±5	2.387	2.268 ~ 2.506	±5	2.288	2.174 ~ 2.402	±5	2.109	2.004 ~ 2.214	±5
0.85	1.991	1.891 ~ 2.091	±5	2.115	2.009 ~ 2.221	±5	2.027	1.926 ~ 2.128	±5	1.868	1.775 ~ 1.961	±5
0.90	1.776	1.687 ~ 1.865	±5	1.886	1.792 ~ 1.980	±5	1.808	1.718 ~ 1.898	±5	1.666	1.583 ~ 1.749	±5
0.95	1.594	1.514 ~ 1.674	±5	1.693	1.603 ~ 1.778	±5	1.622	1.541 ~ 1.703	±5	1.495	1.420 ~ 1.570	±5
1.00	1.439	1.367 ~ 1.511	±5	1.528	1.452 ~ 1.604	±5	1.464	1.391 ~ 1.537	±5	1.350	1.283 ~ 1.418	±5

注：Cr20Ni30 合金每米电阻值与 Cr20Ni35 合金基本相同，故本表中将前者列出。

表 5.4-5 镍基高电阻电热合金的电阻温度修正系数

合金牌号	20℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃	800℃	900℃	1 000℃	1 100℃	1 200℃	1 300℃
Cr20Ni80	1.000	1.006	1.012	1.018	1.025	1.026	1.018	1.010	1.008	1.010	1.014	1.021	1.025	—
Cr15Ni60	1.000	1.011	1.024	1.038	1.052	1.064	1.069	1.073	1.078	1.088	1.095	1.109	—	—
Cr20Ni35	1.000	1.029	1.061	1.090	1.115	1.139	1.157	1.173	1.188	1.208	1.219	1.228	—	—
Cr20Ni30	1.000	1.023	1.052	1.079	1.103	1.125	1.141	1.158	1.173	1.187	1.201	1.214	1.226	—
0Cr27Al7Mo2	1.000	0.992	0.986	0.981	0.978	0.976	0.974	0.972	0.970	0.969	0.968	0.968	0.967	0.967
0Cr21Al6Nb	1.000	0.997	0.996	0.994	0.991	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990	—

2.2.2 镍基高电阻电热合金的其他物理性能

镍基高电阻电热合金作为发热体元件，其最高使用温度是指元件在干燥空气中本身的表面温度，而不是炉膛温度，因为电阻炉的结构不同，其元件与炉膛的温差也不同，一般要求炉膛最高使用温度应比元件最高使用温度低 100℃左右。对电热合金丝材有一个快速寿命的要求，见表 5.4-6。

镍基高电阻电热合金的其他物理性能见表 5.4-7。

表 5.4-6 镍基高电阻电热合金的快速寿命

合金牌号	试验温度/℃	快速寿命值/h
Cr20Ni80	1 200	≥50
Cr30Ni70	1 250	≥50
Cr15Ni60	1 150	≥80
Cr20Ni35	1 100	≥80
Cr20Ni30	1 100	≥80

2.3 镍基高电阻电热合金的力学性能与工艺性能

镍基高电阻电热合金的室温和高温力学性能见表 5.4-8、表 5.4-9。

表 5.4-7 镍基高电阻电热合金的物理性能

合金牌号 \ 性能	元件最高使用温度 /℃	熔点(近似) /℃	密度 $/g\cdot cm^{-3}$	电阻率 (20℃) $/\mu\Omega\cdot m$	比热容 $/J\cdot(g\cdot K)^{-1}$	热导率 $/kJ\cdot(m\cdot h\cdot K)^{-1}$	平均线胀系数 (20～1 000℃) $/10^{-6}K^{-1}$	组织	磁性
Cr20Ni80	1 200	1 400	8.40	1.09	0.440	60.3	18.0	奥氏体	非磁性
Cr30Ni70	1 250	1 380	8.10	1.18	0.461	45.2	17.0	奥氏体	非磁性
Cr15Ni60	1 150	1 390	8.20	1.12	0.494	45.2	17.0	奥氏体	非磁性
Cr20Ni35	1 100	1 390	7.90	1.04	0.500	43.8	19.0	奥氏体	弱磁性
Cr20Ni30	1 100	1 390	7.90	1.04	0.500	43.8	19.0	奥氏体	弱磁性

表 5.4-8 镍基高电阻电热合金的室温力学性能

合 金	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 /%	断面收缩率 /%	硬度 HB
Cr20Ni80	635～785	25～35	60～70	130～150
Cr15Ni60	635～785	25～35	60～75	130～150

表 5.4-9 镍基高电阻电热合金的高温力学性能

合 金	1 000 h 伸长 1%时的蠕变强度/MPa						
	600℃	700℃	800℃	900℃	1 000℃	1 100℃	1 200℃
Cr20Ni80	78.4	39.2	14.7	8.87	3.9	1.47	0.5
Cr15Ni60	78.4	39.2	14.7	8.87	3.9	1.47	—

镍基高电阻电热合金有良好焊接性能，可采用电弧焊、乙炔-氧焊。

3 仪器仪表用镍基精密电阻合金

仪器仪表用电阻合金也可以称为精密电阻器和调节器用电阻合金。它主要用于起动电阻、滑动电阻、电动机速度控制、电路温度控制、电压调节、电桥、电位差计、标准电阻、分流器、直流分流器以及高压电桥等方面。

精密电阻合金除了要求有高的电阻率外，特别要求电阻温度系数低，在 -60～100℃，甚至到 300℃温度范围内，其温度系数都很小，而且直线关系很好；同时要求电阻值稳定，长期使用电阻变化小，目前达到的最好水平为每年变化 10^{-7}；此外还要求对铜的热电势小，易于加工，有良好的力学性能，耐磨、抗氧化、易焊接、有良好的包漆性能。

电阻合金要完全符合这些要求较困难，但作为精密电阻合金，电阻温度系数低、电阻值稳定是最主要的。

3.1 精密电阻合金的牌号与化学成分

精密电阻合金有铜基（如锰铜、新康铜、锗锰铜等）、银基、金基、镍基、铁铬铝等。根据 YB/T 5259—1993、YB/T 5260—1993 规定镍基精密电阻合金的牌号与成分见表 5.4-10 和表 5.4-11。

表 5.4-10 镍基精密电阻合金的牌号与化学成分（1）

合金牌号	化学成分（质量分数）/%					杂质/% ≤				
	Ni	Fe	Cr	Si	Cu	C	Mn	P	S	Al
6J10	余量	≤0.40	9.0～10.0	≤0.20	≤0.20	0.05	0.30	0.010	0.010	—
6J15	55.0～61.0	余量	15.0～18.0	0.40～1.30	—	0.05	1.50	0.030	0.010	0.30
6J20	余量	≤1.50	20.0～23.0	0.40～1.30	—	0.05	0.70	0.010	0.010	0.30

表 5.4-11　镍基精密电阻合金的牌号与化学成分（2）

合金牌号	化学成分（质量分数）/%							杂质/% ≤		
	Cr	Al	Fe	Cu	Mn	Si	Ni	C	S	P
6J22	19.0 ~ 21.5	2.70 ~ 3.20	2.00 ~ 3.00	—	0.50 ~ 1.50	≤0.20	余量	0.04	0.010	0.010
6J23	19.0 ~ 21.5	2.70 ~ 3.20	—	2.00 ~ 3.00	0.50 ~ 1.50	≤ 0.20	余量	0.04	0.010	0.010
6J24	19.0 ~ 21.5	2.00 ~ 3.20	≤0.50	—	1.00 ~ 3.00	0.90 ~ 1.50	余量	0.04	0.010	0.010

表 5.4-11 中的合金是在表 5.4-10 所列合金的基础上改良而开发的几种高电阻精密合金。

此外还有一种俗称德国银的镍铜系电阻合金，其成分为（%）：Ni54 ~ 62，Cr17 ~ 20，Zn24 ~ 27。

3.2　镍基精密电阻合金的物理性能及力学性能

6J10 合金的电阻率较低而电阻温度系数则比较大。6J15、6J20 的电阻率较高而电阻温度系数则较小，其主要物理性能见表 5.4-12。

表 5.4-12　6J10、6J15、6J20 合金的主要物理性能

合金性能	合金牌号		
	6J10	6J15	6J20
20℃时的电阻率/μΩ·m	0.69	1.12	1.08
熔点/℃	1 425	1 390	1 400
密度/$g\cdot cm^{-3}$	8.7	8.2	8.3
电阻温度系数（20 ~ 100℃）/$10^{-6}K^{-1}$	350	150	50
对铜的热电势（20 ~ 100℃）/$\mu V\cdot K^{-1}$	20.5	1.0	5.0
平均线胀系数（20 ~ 100℃）/$10^{-6}K^{-1}$	13.8	13.5	13.0
20℃时的比热容/J·$(g\cdot K)^{-1}$	0.46	0.46	0.46
磁性	无磁性	微磁性	无磁性

电阻合金丝（软态）规定了每米的电阻值及每米电阻值的偏差，见表 5.4-13、表 5.4-14 和表 5.4-15。

表 5.4-13　6J20、6J15 合金每米电阻值

直径/mm	公称每米电阻/$\Omega\cdot m^{-1}$	
	6J20	6J15
0.009	14 600	—
0.010	11 800	—
0.011	10 300	—
0.012	8 660	—
0.014	6 630	—
(0.015)	5 780	—
0.016	5 080	—
0.018	4 010	—
0.020	3 340	—
0.022	2 770	—
0.025	2 140	—
0.028	1 700	—
0.030	1 490	—
0.032	1 310	—
0.035	1 090	—
0.040	835	—
0.045	660	—
0.050	535	—
0.055	442	—
0.060	371	—
0.070	273	—
0.080	209	—
0.090	165	—
0.100	134	138
0.110	111	114
0.120	93.0	95.5
(0.130)	80.6	81.5
0.140	69.5	70.2
(0.150)	60.5	61.0
0.160	53.2	53.7
0.170	47.2	47.5
0.180	42.0	42.5
(0.190)	37.8	38.2
0.200	34.0	34.4
0.220	28.6	29.1
(0.230)	26.2	26.6
0.250	22.2	22.6
0.280	17.7	18.1
0.300	15.4	15.8
0.320	13.6	13.9
(0.330)	12.8	13.1
0.350	11.4	11.6
(0.380)	9.80	9.90
0.400	8.80	8.90

表 5.4-14　6J20、6J15 丝材每米电阻值允许偏差

直径/mm	每米电阻允许偏/%
0.009 ~ 0.018	± 15
0.020 ~ 0.025	± 12
0.028 ~ 0.050	± 10
0.055 ~ 0.080	± 8
0.090 ~ 0.170	± 6
0.180 ~ 0.400	± 5

表 5.4-15 6J10 合金丝材每米电阻值

直径/mm	每米电阻值/Ω·m⁻¹		
	上限值	下限值	公称值
0.009	8 500	7 000	7 940
0.010	7 400	6 200	6 800
0.030	950	750	850
0.045	440	360	400

合金的力学性能是按不同直径丝材拉断时的相对伸长率与破断拉力表示，分别列于表 5.4-16 和表 5.4-17。

表 5.4-16 6J10 合金（软态）丝材相对伸长率

直径 /mm	0.009 ~ 0.012	0.014 ~ 0.018	0.020 ~ 0.050	0.055 ~ 0.090	0.100 ~ 0.130	0.140 ~ 0.400
伸长率 (L_0 = 100 mm)/% ≥	4	8	12	16	18	20

表 5.4-17 6J15、6J20 合金丝材的破断拉力

直径/mm	破断拉力/N ≥	
	软 态	硬 态
0.009	0.039 2	0.069
0.010	0.049 0	0.078
0.011	0.058 8	0.098
0.012	0.068 6	0.108
0.014	0.098 1	0.147
(0.015)	0.108	0.177
0.016	0.127	0.196
0.018	0.137	0.245
0.020	0.196	0.304
0.022	0.235	0.373
0.025	0.304	0.481
0.028	0.392	0.598
0.030	0.441	0.696
0.032	0.510	0.785
0.035	0.608	0.941
0.040	0.785	1.23
0.045	0.981	1.57
0.050	1.226	1.93

改良型的精密电阻合金 6J22、6J23、6J24 不仅具有较大的电阻率和低的电阻温度系数，同时对铜的热电势也很低，主要用于制作各种测量仪器、仪表的精密电阻元件，它们的主要物理性能基本相同，见表 5.4-18。

表 5.4-18 6J22、6J23、6J24 合金的主要物理性能

性 能	合 金		
	6J22	6J23	6J24
电阻率/μΩ·m	1.33	1.33	1.33
电阻温度系数/$10^{-6}K^{-1}$	3.5	2.7	3.5
线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$	13.3	13.3	13.3

续表 5.4-18

性 能	合 金		
	6J22	6J23	6J24
平均对铜的热电势/μV·K^{-1}	0.28	0.25	0.28
密度/g·cm^{-3}	8.1	8.1	8.1
比热容/J·(g·K)$^{-1}$	0.46	0.46	0.46
熔点/℃	1 400	1 400	1 400

合金的力学性能以不同直径丝材的相对伸长率和破断拉力表示，见表 5.4-19。

表 5.4-19 6J22、6J23、6J24 合金的力学性能

合金丝材直径 /mm	伸长率 (L_0 = 100 mm) /% ≥	破断拉力 /N
0.010 ~ 0.012 0.013 ~ 0.016	4 5	0.059 0.098
0.018 ~ 0.020 0.022 ~ 0.025 0.028 ~ 0.030 0.032 ~ 0.036	7	0.157 0.245 0.441 0.637
0.040 ~ 0.050 0.056 ~ 0.063 0.071 ~ 0.080 0.090 ~ 0.10	10	0.981 1.765 2.746 4.903
0.112 ~ 0.400	18	6.374

6J22、6J23、6J24 合金每米电阻值及允许偏差，见表 5.4-20。

表 5.4-20 6J22、6J23、6J24 合金丝材的电阻值

公称直径 /mm	公称每米电阻值 /Ω·m⁻¹	每米电阻值允许偏差 /%
0.010 0.011 0.013 0.014	16 900 14 000 10 000 8 640	±15
0.016 0.018	6 610 5 230	±15
0.020 0.022 0.025 0.028	4 230 3 500 2 710 2 160	±12
0.030 0.032 0.036 0.040 0.045 0.050	1 880 1 650 1 310 1 060 836 677	±10

4 电阻应变计用镍基电阻合金

应变电阻合金是传感器用电阻合金的一种，它包括铜基应变电阻合金（如康铜、锰白铜等）、镍基应变电阻合金（如镍－铬系、镍－钼系）和铁基应变电阻合金（如铁－铬－铝系、铁－铬－镍系、铁－铬－钴系、铁－钴－钼系）。

上节所述的 6J10、6J15 合金也可作为应变电阻合金，因其电阻温度系数较大（见表 5.4-12），故主要用于动态应变

测量，其应变测量温度可达600～800℃，也有用来测量1000℃的应变片。合金经过稳定化处理和采用适当的温度补偿方法，也可用于500℃以下的静态应变测量，因为温度在500℃左右时，合金的电阻将发生异常变化。将合金制成特殊型号的应变片，在核辐射状态下工作良好。

6J21、6J22、6J23等合金的电阻率较高，电阻温度系数较低，一般多用于制作中温自补偿应变片，进行静态应变测量。其测量温度在400℃以下时，合金具有良好的稳定性。当温度超过450℃时，由于合金的组织发生变化而使电阻率急剧改变。合金通过成分的微小改变和热处理制度的调整，可以使电阻温度系由负变化到正，从而将电阻温度系数调整到最小值，这样就为制作在较大温度范围内工作的自补偿应变计创造了条件。

镍－钼系应变电阻合金有 $NiMo_{23}CrAl$、$NiMo_{23}AlV$ 以及YC33合金，这类合金具有高的电阻率（约1.5～1.6 μΩ·m），电阻温度系数也较低（约 $3\times10^{-5}K^{-1}$），电阻与温度的直线关系较好，而且重复性好。

采用 $NiMo_{23}CrAl$ 合金制成的电阻应变计，可在≤430℃工作几百小时，在470℃也可工作几十小时，在500℃则只能使用几小时，因此这种应变计工作温度以≤430℃为宜。合金的物理性能见表5.4-21。

$NiMo_{23}AlV$ 合金比 $NiMo_{23}CrAl$ 合金的电阻率更高，且电阻温度系数小，可以用于制作500℃以下使用的电阻应变计。合金在565℃时出现不稳定状态，因此 $NiMo_{23}AlV$ 合金的使用温度为－200～520℃。

表5.4-21　$NiMo_{23}CrAl$ 合金的物理性能

电阻率 ρ /μΩ·m	电阻温度系数 $/10^{-6}K^{-1}$	应变灵敏度系数 K	线胀系数 $/10^{-6}K^{-1}$	与铜的热电势 $/\mu V\cdot K^{-1}$	σ_b /MPa
1.5～1.6	≤30	2.2±0.05	12	<8	1 373

5　镍基电阻合金发展动向

电阻材料的应用已有100多年历史，传统的电阻合金仍然应用广泛。随着科学技术的发展，要求仪器仪表更加精密化，特别是电子计算机的迅速发展，仪器仪表的电阻元件也要求小型化和高可靠性，因此各种更精密可靠的电阻材料也得到不断研究开发。对于镍基电阻材料而言，非晶态镍基电阻合金用于制造精密电阻器、应变电阻计等有着良好的发展前景，已报道的镍基非晶态电阻合金的成分及主要性能见表5.4-22。

表5.4-22　镍基非晶态电阻合金的主要性能

合金成分	电阻率 ρ /μΩ·m	电阻温度系数 $/10^{-6}K^{-1}$	与铜的热电势 E_{Cu} $/\mu V\cdot K^{-1}$	应变灵敏系数 /K	晶化温度 /K	线胀系数 $/10^{-6}K^{-1}$
$Ni_{67}Si_4B_{29}$	1.39	4.2	1.9	2.1	784	10.7
$Ni_{67}Si_{10}B_{22}$	1.42	3.9	1.9	2.1	791	9.8
$Ni_{68}Si_{15}B_{17}$	1.52	0	2.0	2.0	771	11.3
$Ni_{68}Si_{12}B_{20}$	1.54	－2.3	1.9	1.9	793	10.9
$Ni_{67}Si_7B_{26}$	1.55	－2.6	1.9	2.0	805	10.9
$Ni_{65}Cr_4Si_{10}B_{20}$	1.73	－1.5	0.5	1.9	779	11.2
$Ni_{65}Fe_4Si_{10}B_{21}$	1.75	0	0.6	2.1	778	—
$Ni_{63}Ti_4Si_{10}B_{23}$	1.89	－1.0	0.5	2.1	789	—

编写：唐仁政（中南大学）
审稿：田荣璋（中南大学）

第 5 章　镍基软磁合金

1　概述

软磁合金是一种在外磁场作用下容易磁化，而去除外磁场后磁感应强度又基本消失的磁性合金。评价软磁合金性能的主要特性参数为如下。

1）磁导率 μ　表示磁场方向的磁感应强度 B 与磁场强度 H 之比，即 $\mu=\frac{B}{H}$。磁导率的国际 SI 制单位为 H/m，CGS 制单位为 G/Oe。对于软磁材料通常以初始磁导率 μ_i 和最大磁导率 μ_m 为评价指标。初始磁导率是指外磁场强度趋近于零时磁感应强度 B 与磁场强度 H 之比，即

$$\mu_i=\lim_{H\to 0}\frac{B}{H}$$

或者说 μ_i 是正常磁化曲线上 $H=0$ 这一点的斜率。严格来说，μ_i 是不能直接测量的，只能通过外推法计算得出。但由于软磁材料 $B-H$ 关系接近于直线，故有关标准中是规定每种软磁材料在某一低磁场下的 B/H 值作为该材料的初始磁导率 μ_i。

最大磁导率 μ_m，则是指 μ 与 H 的关系曲线中的最大值。

2）饱和磁感应强度 B_s　表示在外磁场足够强的情况下，合金可能达到的最大磁感应强度。国际 SI 制单位为 T，CGS 制单位为 Gs。

3）剩余磁感应强度 B_r　表示材料经一定强度的磁场磁化后，再将磁场强度减至 0，此时材料中所剩余的磁感应强度。通常也称为剩磁。

4）矫顽力 H_c　表示材料在对称周期磁化条件下，在 $B=0$ 时所对应的磁场强度。其国际 SI 制单位为 A/m，CGS 制单位为 Oe。

5）涡流损耗　表示材料在循环磁化条件下，在垂直于磁场平面内，必然会产生涡流电流，此涡流发热所产生的能量损失即为涡流损耗。

6）磁滞损耗　表示材料在循环磁化条件下，每磁化一周由于磁滞所消耗的能量。其大小与磁滞回线的面积成正比。所以材料的矫顽力越小，其磁滞损耗越小。

上述这些磁性能参数，可在材料的磁滞回线中反映出来，见图 5.5-1。

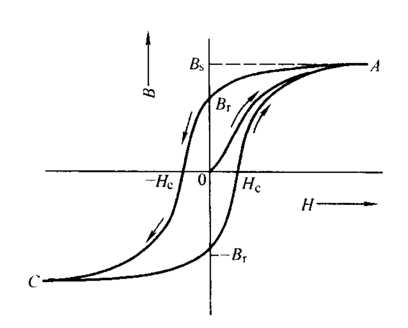


图 5.5-1　磁滞回线示意图

软磁材料的分类可根据主要成分分类，如工业纯铁、硅钢、铁镍基合金、铁硅铝合金、铁氧体等。也可按合金的磁性能特点分类，如高磁饱和合金、高导磁率合金、高硬度高耐磨高导磁合金、矩磁合金、恒磁导合金、磁致伸缩合金和磁温度补偿合金等。本章主要介绍铁镍基软磁合金，其他软磁合金可参看本大典第 2 卷。铁镍基软磁合金的镍含量在 35%～80% 范围内，同时含有 65%～20% 左右的铁。习惯上把这类合金统称为铁镍基软磁合金。由于成分不同，磁性能特点也不同，可根据其磁性能特点分为：高磁导率合金、高硬度高磁导合金、矩磁合金、高磁导高饱和磁感应强度合金、恒磁导率合金等。

2　高磁导率软磁合金

高磁导率软磁合金主要是镍基合金，其镍含量都在 75% 以上，这类合金具有很高的初始磁导率和最大磁导率。通常称为坡莫合金（Permalloy），也称高初磁导率合金。它们都有良好的加工性能，可轧制成很薄的薄带。合金适合在交流弱磁场中应用。如电视和仪器仪表中的各种音频变压器、高精度电桥变压器、互感器、磁屏蔽、磁放大器、磁调制器、音频磁头、扼流圈、精密电表中的定片与动片等。

2.1　高磁导率软磁合金的牌号与化学成分

高磁导率软磁合金的牌号与成分见表 5.5-1。

我国生产的上述六个高磁导率合金中都含有 Cr、Mo、Cu 等第三或第四组元，这些元素不但提高了合金的电阻率，降低了涡流损耗，而且使热处理工艺简化并易于控制，另一方面也导致了饱和磁感应强度 B_s 的降低。

2.2　高磁导率软磁合金的性能

高磁导率软磁合金的直流磁性能见表 5.5-2，交流磁性能见表 5.5-3，其物理性能和力学性能见表 5.5-4。

表 5.5-1　高磁导率软磁合金的牌号与成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%									
	Ni	Cr	Mo	Cu	Mn	Si	Fe	C	P	S
								≤		
1J76	75.0～76.5	1.8～2.2	—	4.8～5.2	0.3～0.6	0.15～0.30	余量	0.03	0.02	0.02
1J77	75.5～78.0	—	3.9～4.5	4.8～6.0	0.3～0.6	0.15～0.30	余量	0.03	0.02	0.02
1J79	78.5～80.0	—	3.8～4.1	≤0.20	0.6～1.1	0.30～0.50	余量	0.03	0.02	0.02
1J80	79.0～81.5	2.6～3.0	—	≤0.20	0.6～1.1	1.10～1.50	余量	0.03	0.02	0.02
1J85	79.0～81.0	—	4.8～5.2	≤0.20	0.3～0.6	0.15～0.30	余量	0.03	0.02	0.02
1J86	80.5～81.5	—	5.8～6.2	—	≤1.0	≤0.30	余量	0.03	0.02	0.02

表 5.5-2 高磁导率软磁合金的直流磁性能

合金牌号	产品种类	级别	厚度或直径 /mm	在 0.08 A/m 磁场强度中的磁导率 $\mu_{0.08}$	最大磁导率 μ_m	矫顽力（在饱和磁感应强度下）H_c	饱和磁感应强度 B_s
				mH/m		A/m	T
				≥		≤	
1J76	冷轧带材		0.02～0.04	18.8	75	4.8	0.75
			0.05～0.09	22.5	125	3.2	0.75
			0.10～0.19	25	175	2.8	0.75
			0.20～0.50	31.3	225	1.4	0.75
1J77	冷轧带材		0.05～0.09	37.5	175	2.0	0.60
			0.10～0.19	50	225	1.2	0.60
			0.20～0.34	62.5	275	1.0	0.60
			0.35～0.50	75	312.5	0.8	0.60
1J79	冷轧带材	Ⅰ	0.005	12.5	44	6.4	0.75
			0.01	17.5	87.5	4.8	0.75
			0.02～0.04	20	112.5	4.0	0.75
			0.05～0.09	22.5	137.5	2.8	0.75
			0.10～0.19	25	162.5	2.0	0.75
			0.20～0.34	28	225	1.6	0.75
			0.35～1.00	31	250	1.2	0.75
			1.10～2.50	28	225	1.6	0.75
			2.51～3.00	26.3	187.5	2.0	0.75
		Ⅱ	0.005	15	75	4.8	0.75
			0.01	20	110	3.2	0.75
			0.02～0.04	25	125	2.4	0.75
			0.05～0.09	25	150	1.6	0.75
			0.10～0.19	28	190	1.2	0.75
			0.20～0.34	31	250	1.2	0.75
			0.35～1.00	38	280	1.0	0.75
			1.10～2.50	31	230	1.2	0.75
		Ⅲ	0.01	25	150	2.4	0.73
			0.02～0.04	31	190	1.6	0.73
			0.05～0.09	38	250	1.2	0.73
			0.10～0.19	38	250	1.2	0.73
			0.20～0.34	38	280	1.0	0.73
			0.35	44	310	1.0	0.73
	热轧（锻）扁材		3～22	25	125	2.4	0.75
	热轧（锻）棒材		8～100	25	125	2.4	0.75
1J80	冷轧带材	Ⅰ	0.005	10	38	8.0	0.65
			0.01	17.5	75	4.8	0.65
			0.02～0.04	23	93.8	4.0	0.65
			0.05～0.09	25	112.5	3.2	0.65
			0.10～0.19	28	150	2.4	0.65
			0.20～0.34	35	175	1.6	0.65
			0.35～0.50	44	200	1.2	0.65
			0.51～1.00	43.8	200	1.0	0.65
			1.10～2.50	31	190	1.2	0.65
		Ⅱ	0.02～0.04	28	125	3.2	0.63
			0.05～0.09	38	190	1.6	0.63
			0.10～0.19	40	200	1.2	0.63
			0.20～0.34	44	200	1.2	0.63
			0.35～0.50	44	250	1.0	0.63
		Ⅲ	0.01	31	110	3.2	0.63
			0.02～0.04	38	150	1.6	0.63
			0.05～0.09	50	250	1.0	0.63
			0.10～0.34	56	250	1.0	0.63
			0.35～0.50	63	310	0.8	0.63
	热轧（锻）扁材		3～22	27.5	100	2.4	0.65
	热轧（锻）棒材		8～100	27.5	100	2.4	0.65

续表 5.5-2

合金牌号	产品种类	级别	厚度或直径 /mm	在 0.08 A/m 磁场强度中的磁导率 $\mu_{0.08}$	最大磁导率 μ_m	矫顽力（在饱和磁感应强度下）H_c	饱和磁感应强度 B_s
				mH/m		A/m	T
				≥		≤	
1J85	冷轧带材	Ⅰ	0.005 ~ 0.01	20	87.5	4.8	0.70
			0.02 ~ 0.04	22.5	100	3.6	0.70
			0.05 ~ 0.09	35	137.5	2.4	0.70
			0.10 ~ 0.19	37.5	187.5	1.6	0.70
			0.20 ~ 0.34	50	225	1.2	0.70
			0.35 ~ 1.00	62.5	312.5	0.8	0.70
			1.10 ~ 2.50	50	187.5	1.2	0.70
			2.51 ~ 3.00	43.8	150	1.4	0.70
		Ⅱ	0.02 ~ 0.04	37.5	137.5	2.4	0.70
			0.05 ~ 0.09	50	175	1.6	0.70
			0.10 ~ 0.19	62.5	225	1.2	0.70
			0.20 ~ 0.34	75	250	1.0	0.70
			0.35	68.8	325	0.7	0.70
	热轧（锻）扁材		3 ~ 22	37.5	125	1.6	0.70
	热轧（锻）棒材		8 ~ 100	37.5	125	1.6	0.70
1J86	冷轧带材		0.005 ~ 0.01	12.5	100	4.0	0.60
			0.02 ~ 0.04	37.5	137.5	2.4	0.60
			0.05 ~ 0.09	50	187.5	1.4	0.60
			0.10 ~ 0.19	62.5	225	1.2	0.60
			0.20 ~ 0.34	75	275	0.7	0.60
			0.35 ~ 1.00	62.5	250	1.2	0.60

注：饱和磁感应强度 B_s 在 800 A/m 外磁场强度下测量。

表 5.5-3　高磁导率软磁合金的交流磁性能

合金牌号	产品种类	级别	厚度 /mm	当磁场强度峰值为 0.1 A/m 时，在不同频率下的弹性磁导率 μ_1			
				60 Hz	400 Hz	1 kHz	10 kHz
				mH/m			
				≥			
1J79	冷轧带材	Ⅱ	0.02	—	—	17.5	12.5
			0.05	—	—	18.8	9.4
			0.10	—	22.5	15	—
			0.20	—	12.5	7.5	—
			0.35	25	8.8	—	—
1J85	冷轧带材	Ⅱ	0.02	—	—	20	15
			0.05	—	—	31.3	11.3
			0.10	—	31.3	25	—
			0.20	—	23.8	10	—
			0.35	38	12.5	—	—

表 5.5-4　高磁导率软磁合金的物理、力学性能

合金牌号	电阻率 /μΩ·m	密度 /g·cm⁻³	居里点 /℃	饱和磁致伸缩系数 /10⁻⁶	布氏硬度 HB		抗拉强度 σ_b/MPa		屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa		伸长率 δ/%	
					硬态	软态	硬态	软态	硬态	软态	硬态	软态
1J76	0.55	8.6	400	2.4	—	—	—	—	—	—	—	—
1J77	0.55	8.6	350	—	—	—	980	540	—	—	2	40
1J79	0.55	8.6	450	2	210	120	1 030	560	980	150	3	50

续表 5.5-4

合金牌号	电阻率 /μΩ·m	密度 /g·cm⁻³	居里点 /℃	饱和磁致伸缩系数 /10⁻⁶	布氏硬度 HB		抗拉强度 σ_b/MPa		屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa		伸长率 δ/%	
					硬态	软态	硬态	软态	硬态	软态	硬态	软态
1J80	0.62	8.5	330	—	240	130	930	560	885	150	4	40
1J85	0.56	8.75	400	0.5	—	—	—	—	—	—	—	—
1J86	0.60	8.85	—	0.5	—	—	—	—	—	—	—	—

3　耐磨高磁导软磁合金

耐磨高磁导合金不仅具有高初始磁导率、低矫顽力、高电阻，而且硬度高，磁性对应力不敏感，合金有良好的耐磨性。一般适用于制作录音机、录像机、磁盘机、数字磁带机以及某些电影放映机的磁头铁心材料，通常称为磁头合金。此外也可用于微特电机、变压器、传感器、磁放大器等各种高频电感元件的铁心。

3.1　耐磨高磁导合金的牌号与化学成分

根据 GB/T 14987—1994 规定的此类合金的牌号与化学成分见表 5.5-5。

冶标 YB/T 086—1996 又增加几个磁头合金，规定成分见表 5.5-6。

3.2　耐磨高磁导合金的性能

耐磨高磁导合金的直流磁性能、电阻率和维氏硬度值见表 5.5-7。

合金的弹性磁导率见表 5.5-8。

表 5.5-5 耐磨高磁导合金的牌号与成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%										
	Ni	Mo	Nb	Mn	Al	Ti	Fe	C	Si	P	S
								≤			
1J87	78.5~80.5	1.6~2.2	6.5~7.5	0.3~0.6	—	—	余量	0.03	0.30	0.02	0.02
1J88	79.5~80.5	—	7.5~9.0	≤0.6	—	—	余量	0.03	0.30	0.02	0.02
1J89	78.5~80.5	3.5~4.5	3.0~3.6	0.5~1.0	—	1.8~2.8	余量	0.03	0.30	0.02	0.02
1J90	79.0~80.0	1.8~2.2	4.8~7.2	≤0.6	0.4~0.6	—	余量	0.03	0.30	0.02	0.02
1J91	78.5~80.5	—	7.7~8.4	≤0.6	0.9~1.2	—	余量	0.03	0.30	0.02	0.02

表 5.5-6 冶标 YB/T 086—1996 规定的磁头合金的牌号与化学成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%										
	Ni	Mo	Nb	Mn	Cu	W	Cr	Si	Fe	C	P	S
										≤		
1J87C	80.0~81.5	1.0~2.0	4.0~5.5	0.3~0.6	—	—	—	≤0.3	余	0.03	0.02	0.02
1J92	80.1~81.1	1.0~1.5	3.0~4.0	≤0.6	—	1.0~1.5	—	≤0.3	余	0.03	0.02	0.02
1J93	80.5~81.5	3.0~4.0	3.0~4.5	0.3~0.6	—	—	—	≤0.3	余	0.03	0.02	0.02
1J94	79.5~81.0	4.5~5.0	0.6~1.0	0.3~0.6	1.5~2.5	—	0.3~0.7	≤0.3	余	0.03	0.02	0.02
1J95	83.0~84.0	1.2~1.6	0.4~0.6			—		2.8~3.3	余	0.03	0.02	0.02

表 5.5-7 耐磨高磁导合金的直流磁性能、电阻率和硬度值（摘自 GB/T 14987—1994）

合金牌号	合金带厚度/mm	直流磁性能 初始磁导率 μ_0/mH·m⁻¹	最大磁导率 μ_m/mH·m⁻¹	矫顽力 H_c/A·m⁻¹	磁感应强度 B_s/T	电阻率 ρ/μΩ·m	硬度 HV
		≥		≤	≥	≥	
1J87	0.02~0.04	37.5	125	2.0	0.5	75	190
	>0.04~0.09	43.8	150	1.2			
	>0.09~0.29	50.0	250	0.8			
	>0.29~0.50	43.8	225	1.2			
	>0.50~1.00	43.8	187.5	1.6			
1J88	0.02~0.04	37.5	125	2.0	0.55	70	180
	>0.04~0.09	43.8	150	1.6			
	>0.09~0.29	50.0	187.5	1.2			
	>0.29~1.00	37.5	125	2.0			
1J89	0.02~0.04	18.8	87.5	2.4	0.45	85	200
	>0.04~0.09	25.0	112.5	1.6			
	>0.09~0.29	31.3	125	1.2			
	>0.29~1.00	25.0	100	1.6			
1J90	0.02~0.04	37.5	125	2.0	0.45	85	250
	>0.04~0.09	43.8	187.5	1.6			
	>0.09~0.29	50.0	225	0.8			
	>0.29~1.00	43.8	187.5	1.2			
1J91	0.02~0.04	6.25	50	3.2	0.45	80	300
	>0.04~0.09	10.0	75	2.0			
	>0.09~0.29	12.5	100	1.6			
	>0.29~1.00	10.0	75	2.0			

表 5.5-8 耐磨高磁导合金的弹性磁导率（摘自 GB/T 14987—1994）

合金牌号	合金带厚度/mm	在 $B=20\times10^{-4}$T 下的弹性磁导率 μ_1/mH·m⁻¹ 1 kHz	10 kHz	100 kHz	500 kHz	1 000 kHz
		≥				
1J87	0.02	28.8	25.0	6.80	1.25	0.875
	0.03	31.3	21.3	5.00	1.00	0.625
	0.05	32.5	11.3	2.25	0.50	0.250
	0.10	28.8	5.63	1.00	—	—
1J88	0.02	27.5	25.0	5.63	—	—
	0.03	30.0	21.3	3.75	—	—
	0.05	27.5	11.3	1.88	—	—
	0.10	25.0	5.63	0.975	—	—
1J89	0.02	15.0	12.5	6.80	1.50	1.00
	0.03	17.5	8.75	5.00	1.25	0.75
	0.05	20.0	5.00	2.25	0.625	0.375
	0.10	16.3	2.50	1.00	—	—
1J90	0.02	28.8	25.0	7.50	1.50	1.00
	0.03	31.3	21.3	5.63	1.13	—
	0.05	32.5	18.8	2.50	0.75	—
	0.10	28.8	6.25	1.00	—	—
1J91	0.02	4.88	4.38	3.75	1.25	0.875
	0.03	5.00	4.00	1.88	1.00	—
	0.05	5.25	3.75	1.25	0.375	—
	0.10	4.63	2.50	0.625	—	—

冶标 YB/T 086-1996 规定增加的几个磁头合金经热处理后的直流磁性能见表 5.5-9，交流磁性能见表 5.5-10。

冶标规定的 1J87C 等几个磁头合金的物理性能和退火后的硬度值如表 5.5-11。

表 5.5-9　1J87C 等磁头合金热处理后的直流磁性能

合金牌号	磁导率（$\mu_{0.4}$）（$H=0.4$ A/m）/mH·m^{-1}	最大磁导率（μ_m）/mH·m^{-1}	磁通密度（B_{10}）/T	矫顽力（H_c）/A·m^{-1}
	≥			≤
1J87C	43.75	187.5	0.64	1.5
1J92	43.75	187.5	0.70	1.5
1J93	43.75	125	0.60	2.0
1J94	50	125	0.60	1.6
1J95	50	125	0.55	1.6

表 5.5-10　1J87C 等磁头合金热处理后的交流磁性能

合金牌号	合金带厚度/mm	在 $B=20$ Gs 下的弹性磁导率 μ_1/mH·m^{-1}			
		0.3 kHz	1 kHz	10 kHz	100 kHz
		≥			
1J87C	0.094	43.75	31.25	8.75	1.875
	0.116	37.5	25.0	7.5	1.50
	0.146	31.25	18.75	6.25	1.0
	0.196	18.75	12.5	3.75	0.75
1J92	0.094	37.5	31.25	7.5	1.75
	0.116	31.25	25.0	6.875	1.50
	0.146	25.0	18.75	5.625	1.0
	0.196	18.75	12.5	3.75	0.75
1J93	0.094	50.0	31.25	10.0	1.875
	0.116	43.75	25.0	8.75	1.50
	0.146	37.5	18.75	6.25	1.25
	0.196	25.0	15.0	5.0	0.75
1J94	0.118	—	31.25	—	1.75
	0.144	—	18.75	—	1.25
	0.195	—	12.5	—	0.875
1J95	0.116	—	25.0	—	1.625
	0.146	—	17.5	—	0.875
	0.196	—	12.5	—	0.625

表 5.5-11　1J87C 等磁头合金的物理性能和退火态的硬度

合金牌号	电阻率/μΩ·m	密度/g·cm^{-3}	居里点/℃	硬度 HV
1J87C	0.64	8.7	380	150
1J92	0.65	8.82	380	140
1J93	0.65	8.8	330	140
1J94	0.66	8.8	320	130
1J95	0.65	8.6	320	140

用于制作微特电机铁芯用的厚度为 0.20 mm 和 0.35 mm 的 1J87 和 1J90 合金，还要求测定峰值磁导率，其数值见表 5.5-12。

表 5.5-12　1J87、1J90 合金的峰值磁导率

合金牌号	合金带厚度/mm	400 Hz 下峰值磁导率/mH·m^{-1}　≥	
		$\mu_{p0.01}$	μ_{pm}
1J87C	0.20	26.3	50.0
1J90	0.35	20.0	35.0

3.3　耐磨高磁导合金的热处理制度

1J87 等耐磨高磁导合金的热处理制度见表 5.5-13，采用干氢的露点低于 -40℃，并用氧化铝或氧化镁作隔离物。采用真空介质时，真空度应低于 0.133 Pa。

1J87C 等合金的热处理制度如表 5.5-14。

表 5.5-13　1J87 等耐磨高磁导合金的热处理制度

合金牌号	退火介质	合金带厚度/mm	加热温度（随炉升温）/℃	保温时间/h	冷却制度
1J87	干氢或真空	≤0.20	950～1 150	2～3	以 100℃/h 速度冷却到 500℃保温 1 h，再以 10～30℃/h冷却到 350℃，炉冷到 200℃出炉
		>0.20	1 150～1 250	4～6	
1J88	干氢或真空	≤0.20	950～1 150	2～3	以 100～200℃/h（或炉冷）冷却到 500～600℃，再炉冷（200～300℃/h）到 200℃出炉
		>0.20	1 150～1 200	4～5	
1J89	干氢或真空	≤0.20	950～1 100	2～3	以 200～300℃/h冷却到 200℃出炉，或以 200～300℃/h 冷却到 600℃保温 1～4 h，再以 100/h 冷却到 200℃出炉
		>0.20	1 100～1 200	3～5	
1J90	干氢或真空	≤0.20	1 000～1 150	2～3	炉冷至 250℃出炉（或以 250℃/h 冷至 250℃出炉）
		>0.20	1 000～1 200	3～4	
1J91	干氢或真空	≤0.20	1 100～1 150	2～3	炉冷至室温后，再升温至 970℃保温 1 h（介质为氢气或惰性气体），拉到炉口冷却
		>0.20	1 100～1 200	3～4	

表 5.5-14 1J87C 等合金的热处理制度

合金牌号	退火介质	加热温度/℃	保温时间/h	冷却制度
1J87C	氢气	1 050 ~ 1 150	2 ~ 4	以 150 ~ 200℃/h 速度冷至 600℃后，以 200 ~ 300℃/h 速度冷却
1J92		950 ~ 1 100	3 ~ 4	以 150 ~ 200℃/h 速度冷至 600℃后，以 200 ~ 300℃/h 速度冷却
1J93		1 050 ~ 1 150	2 ~ 6	以 150 ~ 200℃/h 速度冷至 500 ~ 550℃后快冷
1J94		1 050 ~ 1 150	2 ~ 4	以 200℃/h 速度冷至 400℃后快冷
1J95		1 050 ~ 1 150	3 ~ 4	以 200℃/h 速度冷至 550 ~ 600℃后快冷

4 矩磁合金

矩磁合金是具有磁各向异性特点的磁性合金，由晶粒取向织构和磁畴取向织构而产生磁各向异性，这种合金的易磁化方向具有接近矩形的磁滞回线，矩磁比 B_r/B_s 通常在 85%以上。

晶粒取向织构的合金，是通过大压下量冷轧后获得变形织构，然后在适当高温下退火，获得再结晶织构，使晶粒的易磁化轴整齐地排列在一定方向上，在这个易磁化轴方向磁化时，便获得高矩磁比、高磁导率和低矫顽力。这类合金通常要求带材的厚度在 0.1 mm 以下。

磁畴取向织构的合金，则是在高温退火以后再进行磁场热处理，以获得磁畴取向织构。沿磁场处理方向具有高矩磁比和高磁导率。这种合金带材的厚度可以比晶粒取向矩磁合金带材厚度厚、使用中可绕卷成环，也可以冲压成环或制成其他便于进行磁场热处理的形状。

矩磁合金主要用于制造磁放大器、磁调制器、中小功率的脉冲变压器、方波变压器、磁心存储器以及计算机装置元件等。

4.1 矩磁合金的牌号与成分

矩磁合金的牌号与化学成分见表 5.5-15。其中 1J51、1J52、1J83 为晶粒取向矩磁合金，1J34、1J65、1J67 和 1J403 为磁畴取向矩磁合金。

表 5.5-15 矩磁合金的牌号与化学成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%									
	Ni	Mo	Mn	Co	Si	Cu	Fe	C	P	S
								≤		
1J34	33.5 ~ 35.0	2.80 ~ 3.20	0.30 ~ 0.60	28.5 ~ 30.0	0.15 ~ 0.30	≤0.20	余	0.03	0.02	0.02
1J51	49.0 ~ 50.5	—	0.30 ~ 0.60	—	0.15 ~ 0.30	≤0.20	余	0.03	0.02	0.02
1J52	49.0 ~ 51.0	1.80 ~ 2.20	0.30 ~ 0.60	—	0.15 ~ 0.30	≤0.20	余	0.03	0.02	0.02
1J65	64.5 ~ 66.0	—	0.30 ~ 0.60	—	0.15 ~ 0.30	≤0.20	余	0.03	0.02	0.02
1J67	64.5 ~ 66.0	1.80 ~ 2.20	0.30 ~ 0.60	—	0.15 ~ 0.30	≤ 0.20	余	0.03	0.02	0.02
1J83	78.5 ~ 79.5	2.80 ~ 3.20	0.30 ~ 0.60	—	0.15 ~ 0.30	≤0.20	余	0.03	0.02	0.02
1J403	39.0 ~ 41.0	3.80 ~ 4.20	0.30 ~ 0.60	24.5 ~ 25.5	0.15 ~ 0.30	≤0.20	余	0.03	0.02	0.02

4.2 矩磁合金的性能

矩磁合金的磁性能见表 5.5-16。

矩磁合金的物理性能和力学性能见表 5.5-17。

表 5.5-16 矩磁合金的磁性能

合金牌号	级别	厚度/mm	在 0.8 A/m 磁场强度中的磁导率 $\mu_{0.8}$	最大磁导率 μ_m	方形系数 B_r/B_m	矫顽力（在饱和磁感应强度下）H_c	铁损 $P_{1/400}$	铁损 $P_{1/3\,000}$	饱和磁感应强度 B_s
			mH/m	mH/m		A/m	W/kg	W/kg	T
			≥	≥	≥	≤	≤	≤	
1J34		0.005 ~ 0.01	—	62.5	0.90	20	—	—	1.5
		0.02 ~ 0.04		75	0.90	16			1.5
		0.05 ~ 0.09		112.5	0.90	9.6			1.5
		0.10 ~ 0.20		137.5	0.87	8			1.5
1J51	Ⅰ	0.005	—	19	0.80	40	—	—	1.5
		0.01		25	0.83	32			1.5
		0.02 ~ 0.09		50	0.85	20			1.5
		0.10		50	0.85	18			1.5
	Ⅱ	0.01	—	44	0.87	20		—	1.50
		0.02 ~ 0.04		75	0.92	15	4.0		1.50
		0.05 ~ 0.09		75	0.92	15	4.5		1.50
		0.10		75	0.90	15	5.0		1.50
	Ⅲ	0.01	—	75	0.91	15	—	—	1.52
		0.02 ~ 0.04		95	0.94	13			1.52
		0.05		100	0.94	11			1.52

续表 5.5-16

合金牌号	级别	厚度/mm	在0.8 A/m磁场强度中的磁导率 $\mu_{0.8}$	最大磁导率 μ_m	方形系数 B_r/B_m	矫顽力（在饱和磁感应强度下）H_c	铁损 $P_{1/400}$	铁损 $P_{1/3000}$	饱和磁感应强度 B_s
			mH/m	mH/m		A/m	W/kg	W/kg	T
			≥	≥	≥	≤	≤	≤	
1J52		0.02～0.04	—	62.5	0.90	20	—	—	1.40
		0.05～0.10		87.5	0.90	16			1.40
1J65		0.005～0.01	—	100	0.90	8.0	—	—	1.30
		0.02～0.04		125	0.90	6.4			1.30
		0.05～0.09		187.5	0.90	4.8			1.30
		0.10～0.50		275	0.90	3.2			1.30
1J67		0.02～0.04	—	200	0.90	6.4	—	—	1.20
		0.05～0.09		250	0.90	4.8			1.20
		0.10～0.19		312.5	0.90	4.0			1.20
		0.20～0.50		437.5	0.90	3.2			1.20
1J83		0.005～0.01	5	62.5	0.80	5.6	—	—	0.82
		0.02～0.04	8.8	125	0.80	4.0			0.82
		0.05～0.09	8.8	187.5	0.80	2.4			0.82
		0.1	20	225	0.80	1.6			0.82
1J403	Ⅰ	0.02	-	500	0.97	3.2	3.0～4.5	35～65	1.38
		0.05		625	0.97	2.4	3.0～4.5	35～65	1.38
	Ⅱ	0.02	—	375	0.95	4.0	3.0	35	1.38
		0.05		500	0.95	3.2	3.5	40	1.38
		0.10		625	0.95	2.4	2.5	30	1.38

注：1. 饱和磁感应强度 B_s，对1J34、1J51、1J52和1J403合金是在2000～2 400 A/m外磁场下测量；对1J65、1J67和1J83合金是在800 A/m外磁场下测量。
2. 铁损 $P_{1/400}$、$P_{1/3000}$分别表示频率为400 Hz、3 000 Hz，磁感应强度峰值为1T时的铁损。
3. 方形系数 B_r/B_m 中的 B_m 系外磁场强度为80 A/m时的磁感应强度。
4. 1J403合金Ⅰ级产品的铁损应在－40℃、＋20℃和＋100℃温度下测定。

表 5.5-17　矩磁合金的物理性能和力学性能

合金牌号	电阻率 /μΩ·m	密度 /g·cm⁻³	居里点 /℃	饱和磁致伸缩系数/10⁻⁶	布氏硬度 HB 冷硬态	布氏硬度 HB 软态	抗拉强度 σ_b/MPa 冷硬态	抗拉强度 σ_b/MPa 软态	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa 冷硬态	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa 软态	伸长率 /% 冷硬态	伸长率 /% 软态
1J403	0.55	8.55	600	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1J34	0.50	8.70	—	—	—	—	—	540	—	—	—	42
1J51	0.45	8.20	500	—	—	—	—	450	—	—	3	37
1J52	—	8.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1J65	0.25	8.35	600	—	—	—	—	540	—	—	—	43
1J67	0.45	8.48	530	—	—	—	930	540	—	—	3	50
1J83	0.50	8.60	460	—	—	—	1 030	490	—	—	3	50

5　中磁导中磁饱和软磁合金

这类合金的镍含量在45%～50%左右。其饱和磁感应强度 B_s 为1～1.5T，高于高导磁合金（$B_s \leqslant 0.8$T）而低于高磁饱和合金（$B_s \approx 2$T），其磁导率及矫顽力也介于这两类合金之间。主要用于中等磁场工作的各种变压器、继电器、电磁离合器铁芯，这类合金的电阻率也比高磁饱合金的电阻率高，因而也可适用于较高的频率。其牌号与化学成分如表5.5-18。

中磁导中磁饱和软磁合金的直流磁性能见表5.5-19。

其物理性能和力学性能见表5.5-20。

表 5.5-18　中磁导中磁饱和软磁合金的牌号与化学成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/% Ni	Mn	Si	Cr	Cu	Fe	C ≥	P ≥	S ≥
1J46	45.0～46.5	0.60～1.10	0.15～0.30	—	≤0.20	余	0.03	0.02	0.02
1J50	49.0～50.5	0.30～0.60	0.15～0.30	—	<0.20	余	0.03	0.02	0.02
1J54	49.5～51.0	0.60～1.10	0.10～1.40	3.80～4.20	≤0.20	余	0.03	0.02	0.02

表 5.5-19 中磁导中磁饱和软磁合金的直流磁性能

合金牌号	产品种类	级别	厚度或直径/mm	在0.4 A/m磁场强度中的磁导率 $\mu_{0.08}$ mH/m ≥	最大磁导率 μ_m mH/m ≥	矫顽力（在饱和磁感应强度下）H_c A/m ≤	饱和磁感应强度 B_s T
1J46	冷轧带材		0.02～0.04	1.6	22.5	32	1.5
			0.05～0.09	2.0	27.5	24	1.5
			0.10～0.19	2.5	31.3	20	1.5
			0.20～0.34	3.1	37.5	16	1.5
			0.35～2.50	3.5	45.0	12	1.5
	热轧（锻）扁材		3～22	2.5	31.3	16	1.5
	热轧（锻）棒材		8～100	2.5	31.3	16	1.5
1J50	冷轧带材	Ⅰ	0.05～0.09	2.5	35	20	1.5
			0.10～0.19	2.9	40	14.4	1.5
			0.20～0.34	3.3	50	11.2	1.5
			0.35～0.50	3.8	62.5	9.6	1.5
			0.51～1.00	3.8	62.5	9.6	1.5
			1.10～2.50	3.5	56.3	9.6	1.5
		Ⅱ	0.10～0.19	3.8	43.8	12	1.5
			0.20～0.34	4.4	56.3	10.4	1.5
			0.35～0.50	5.0	65	8.8	1.5
			0.51～1.00	5.0	50	10	1.5
			1.10～2.50	3.8	44	12	1.5
		Ⅲ	0.05～0.20	12.5	75	4.8	1.52
	热轧（锻）扁材		3～22	3.1	31.3	14.4	1.5
	热轧（锻）棒材		8～100	3.1	31.3	14.4	1.5
1J54	冷轧带材	Ⅰ	0.005	1.25	10	56	1.0
			0.01	1.60	12.5	40	1.0
			0.02～0.04	1.9	20	20	1.0
			0.05～0.09	2.5	25	16	1.0
			0.10～0.19	3.1	31.3	12	1.0
			0.20～0.34	3.8	35	9.6	1.0
			0.35～0.50	4.0	40	8	1.0
			0.51～1.00	3.8	40	8	1.0
		Ⅱ	0.02～0.04	3.8	31	12	1.0
			0.05～0.09	3.8	31	12	1.0
			0.10～0.19	3.9	35	10	1.0
			0.20～0.34	3.9	37.5	10	1.0
			0.35～0.50	4.4	44	8	1.0
	热轧（锻）扁材		3～22	2.0	20	20	1.0
	热轧（锻）棒材		8～100	2.0	20	20	1.0

注：饱和磁感应强度 B_s 在2 000～2 400 A/m外磁场强度下测量。

表 5.5-20 中磁导中磁饱和软磁合金的物理性能和力学性能

合金牌号	电阻率 /μΩ·m	密度 /g·cm^{-3}	居里点 /℃	饱和磁致伸缩系数/10^{-6}	布氏硬度 HB		抗拉强度 /MPa		屈服强度 /MPa		伸长率 /%	
					冷硬	软态	冷硬	软态	冷硬	软态	冷硬	软态
1J46	0.45	8.2	400	25	170	130	735	—	735	—	3	—
1J50	0.45	8.2	500	25	170	130	785	450	685	150	3	37
1J54	0.90	8.2	360	—	190	125	885	500	835	150	2	40

6 恒磁导率软磁合金

一般软磁合金的磁导率会随着磁场强度的改变而迅速变化，而恒磁导合金则在一定宽度的磁场强度范围内，导磁率基本恒定不变，而且在一定温度和频率范围内也基本保持恒定不变。这种合金恒磁导率特性可以通过对合金进行横向磁场热处理（即磁场热处理的方向是垂直于使用中的磁场方向）而获得。合金的牌号与成分见表5.5-21。

表5.5-21 1J66恒磁导率软磁合金的牌号与成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%						
	Ni	Mn	Fe	C	P	S	Si
				≤			
1J66	64.5～66.5	0.70～1.10	余量	0.03	0.02	0.02	0.1

1J66合金经热处理后的磁性能见表5.5-22。

表5.5-22 1J66恒磁导率合金的磁性能

合金牌号	厚度/mm	级别	感应磁导率 μ_L /mH·m⁻¹	交流稳定值 α	交直流稳定值 α	温度稳定值 α_T ≤
			≥	%		
1J66	0.05～0.10	Ⅰ	3.50	约10	约9	8
		Ⅱ	3.75	约7	约6	5

1J66合金的物理性能见表5.5-23。

表5.5-23 1J66恒磁导率合金的磁性能

合金牌号	电阻率/μΩ·m	密度/g·cm⁻³	居里点/℃	饱和磁感应强度/T
1J66	0.25	8.25	600	1.3

1J66合金的热处理制度如表5.5-24。

表5.5-24 1J66恒磁导率合金的热处理制度

热处理步骤	介质	加热温度与速度	保温时间/h	冷却制度
第一步高温退火	氢气或真空	1 200℃随炉升温	3	100℃/h冷却到600℃，炉冷至300℃空冷
第二步横向磁场热处理	氢气	650℃随炉升温	1	在16 kA/m的横向磁场中，以50～100℃/h冷却至200℃，空冷

7 磁温度补偿软磁合金

某些软磁材料在处于其居里点附近时，在一定磁场下磁感应强度和饱和磁感应强度随温度的变化而迅速变化。如果使用环境温度接近居里点温度，而且在使用温度范围内合金的磁感应强度随温度的变化接近于直线，那么就可以利用这种磁性温度特性来补偿仪器仪表电磁系统的温度误差，用于消除或改变诸如无触点温度控制器、热继电器另件和调压器等所组装仪表的读数与温度的关系。

磁温度补偿合金的牌号和成分如表5.5-25。

表5.5-25 磁温度补偿合金的牌号与化学成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%								
	Ni	Mn	Si	Al	Cr	Fe	C	P	S
							≤		
1J30	29.5～30.5	≤0.40	≤0.30	—	—	余量	0.04	0.02	0.02
1J31	30.5～31.5	≤0.40	≤0.30	—	—	余量	0.04	0.02	0.02
1J32	31.5～32.5	≤0.40	≤0.30	—	—	余量	0.04	0.02	0.02
1J33	32.8～33.8	0.30～0.60	0.30～0.60	1.00～2.00	—	余量	0.05	0.02	0.02
1J38	37.5～38.5	0.15～0.30	0.30～0.60	—	12.5～13.5	余量	0.05	0.02	0.02

上述1J30、1J31、1J32属铁镍二元合金，其居里点以及磁感应强度－温度曲线都对合金成分十分敏感。镍含量变化0.1%或碳含量变化0.01%时，居里温度可变化5℃，而且在－65℃以下将发生结构和性能的不可逆变化，所以这几个合金的生产和使用都要求严格控制。其使用温度为－55～70℃，主要用于行波管、磁控管等。

1J33合金使用温度范围为－40～80℃，主要用于电压调节器。

1J38合金使用温度范围为－40～60℃，主要用于电度表和汽车仪表。

这类合金的磁性能见表5.5-26。

表5.5-26 磁温度补偿合金的磁性能

合金牌号	在磁场强度为8 000 A/m时不同温度下的磁感应强度 B					磁感应强度降落差		
	－20℃	20℃	40℃	60℃	80℃	$B_{-20℃}$～$B_{20℃}$	$B_{20℃}$～$B_{40℃}$	$B_{20℃}$～$B_{80℃}$
	T							
1J30	0.40～0.60	0.20～0.45	—	0.02～0.13	—	—	—	—
1J31	0.60～0.85	0.40～0.65	—	0.15～0.45	—	—	—	—
1J32	0.80～1.10	0.60～0.95	—	0.40～0.75	—	—	—	—
1J33	—	0.40～0.70	—	—	0.10～0.40	—	—	0.22～0.42
1J38	0.25～0.42	0.05～0.24	0.015～0.12	—	—	0.16～0.24	0.035～0.15	—

为了更好地满足电度表和汽车里程表的使用要求，我国还研制生产了磁感应强度波动允许范围较窄的铁镍铬磁温度补偿合金，其成分见表5.5-27，磁性能见表5.5-28。

表 5.5-27　铁镍铬磁温度补偿合金的牌号与成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%						
	Ni	Cr	Mn	Fe	C	P	S
					≤		
CNi37B-1	36.5～38.5	11.5～13.5	0.4～1.6	余	0.05	0.02	0.45

表 5.5-28　CNi37B-1 合金的磁性能

合金牌号	磁化场为 8 kA/m，温度为 20℃时的磁感应强度 B_{20}/T	磁化场为 8 kA/m 时，不同温度下的磁感应强度 B_t 与 B_{20} 之比		
		B_{-40}/B_{20}	B_{-20}/B_{20}	B_{60}/B_{20}
CNi37B-1	0.05～0.09	—	3.7～5.5	0.25～0.55
CNi37B-2	0.1～0.2	—	1.9～2.6	0.13～0.28
CNi37B-3	0.12～0.24	1.8～3.2	—	0.15～0.30

8　磁致伸缩合金

磁性材料的磁致伸缩效应表现为在材料的磁化方向（纵向）和与其垂直的方向（横向）会发生相反的尺寸伸缩，与此同时也伴生着材料体积的变化。材料尺寸伸缩变化的频率（振动的频率）可为材料磁化电流频率的 2 倍。同时这类材料还存在上述磁致伸缩过程相反的过程，即材料在拉伸或压缩力的作用下，材料本身在受力方向或其垂直方向会发生磁化强度的变化。具有这种磁致伸缩效应很强烈的合金称为磁致伸缩合金。

这类材料主要用作音频或超音频（100～300 Hz）声波发生器振子（铁芯），它广泛应用于水下通讯和探测、金属探伤、医疗器械、研磨、焊接等领域。将磁致伸缩产生的高频机械振动传输在刀具上，可对硬质材料，如玻璃、陶瓷、硬质合金等进行雕刻和加工。此外磁致伸缩材料还可用于滤波、稳频和力的测量。

纯镍、Ni95-Co5 合金、Ni50-Fe50 合金都是磁致伸缩合金。

编写：唐仁政（中南大学）
审稿：田荣璋（中南大学）

第6章 其他镍基功能材料

1 电真空用镍及镍合金

虽然半导体晶体管技术的发展十分迅速，许多电真空器件已被取代，但是由于电真空器件具有功率大，工作温度高的特点，仍然在信息技术领域中占用不可取代的重要地位。

电真空器件是指由电子通过真空或气体的运动来实现电传导的一种器件。它包括微波器件、超高频电真空器件、空间电荷控制器件、离子器件、电子束管等大类器件，磁控管、形波管、速调管、天线开关管、发射管、显像管、示波管等多种管种，在电子通讯、广播电视、气象、测量技术、医疗、家电以及国防领域中广泛应用，也是信息技术领域中的重要元件。

在这些电真空器件中，镍及镍合金由于具有很好的电真空性能以及优良的加工性能、力学性能和耐蚀性而获得广泛应用，如制作电真空器件的阴极、栅极、支架及外壳等。这类材料在实际使用中，按其性能特征可分为两类，一类作为电真空器件中的氧化物阴极芯（又分为旁热式阴极芯和直热式阴极芯），另一类为电真空器件的结构用镍合金。

旁热式氧化物阴极芯用镍及镍合金的成分见表5.6-1，直热式氧化物阴极芯用镍钴合金的成分见表5.6-2，电真空器件的结构用镍合金的成分见表5.6-3。

表5.6-1 旁热式氧化物阴极芯用镍及镍合金牌号与成分

牌号	代号	元素	化学成分（质量分数）/%																					
			Ni+Co	Cu	Si	Mn	C	Mg	S	P	Fe	Pb	Bi	As	Sb	Zn	Cd	Sn	W	Al	Ca	Zr	Ti	杂质总和
电真空镍	DN	最小值	99.35	—	0.02	—	0.02	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—						—
		最大值	—	0.06	0.10	0.05	0.10	0.10	0.005	0.002	0.10	0.002	0.002	0.002	0.002	0.007	0.002	0.002						0.35
0.1镍镁合金	NMg0.1	最小值	99.6	—	—	—	—	0.07	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—						—
		最大值	—	0.05	0.02	0.05	0.05	0.15	0.005	0.002	0.07	0.002	0.002	0.002	0.002	0.007	0.002	0.002						0.40
0.19镍硅合金	NSi0.19	最小值	99.4	—	0.15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—						—
		最大值	—	0.05	0.25	0.05	0.10	0.05	0.005	0.002	0.07	0.002	0.002	0.002	0.002	0.007	0.002	0.002						0.50
4-0.15镍钨锆合金	NW4-0.15	最小值	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.0	—	0.07			—
		最大值		0.02	0. 01	0.005	0.01	0.01	0.003	0.002	0.03	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	4.0	0.01	0.17			0.15
4-0.1镍钨锆合金	NW4-0.1	最小值	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.0	—		0.08	—	—
		最大值		0.005	0.005	0.005	0.01	0.005	0.001	0.001	0.03	0.001	0.001	—	0.001	0.003	0.001	0.001	4.0	0.005		0.14	0.005	0.12
4-0.07镍钨镁合金	NW4-0.07	最小值	余量	—	—	—	—	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.5	—				—
		最大值		0.02	0.01	0.005	0.01	0.1	0.001	0.002	0.03	0.002	0.002	0.002	0.002	0.005	0.002	0.002	4.5	0.001				0.2

注：表中仅列最大值的为杂质成分，其余为主成分。

表5.6-2 直热式氧化物阴极芯用镍钴合金成分

合金名称	化学成分（质量分数）/%						
	Ni	Co	Si	Fe	C	Mn	S
电真空用镍钴合金	余量	38～42	0.15～0.25	0.4～0.8	0.1～0.2	0.1～0.2	≤0.01

表5.6-3 电真空器件的结构用镍合金的牌号与成分

牌号	代号	化学成分（质量分数）/%												
		Ni+Co	Mn	Cu	Fe	Si	Mg	Pb	S	P	C	Bi	As	Sb
						≤								
3镍锰合金	NMn3	余量	2.30～3.30	≤0.50	≤0.65	0.3	0.1	0.002	0.03	0.010	0.30	0.002	0.03	0.002
5镍锰合金	NMn5	余量	4.60～5.40	≤0.50	≤0.65	0.3	0.1	0.002	0.03	0.020	0.30	0.002	0.03	0.002
40-2-1镍铜合金	NCu40-2-1	余量	1.25～2.25	38.0～42.0	≤1.0	0.75	—	—	0.024	0.005	0.30	—	—	—

电真空用镍及镍合金的物理性能和力学性能见表 5.6-4、表 5.6-5 和表 5.6-6。

表 5.6-4　镍锰合金的物理性能和力学性能

性　　能	合　　金	
	NMn3	NMn5
液相点/℃	1 442	1 412
固相点/℃	—	1 372
密度/g·cm^{-3}	8.9	8.76
线胀系数 α/10^{-6}K^{-1}	13.4	13.7
热导率 λ/W·(m·K)$^{-1}$	53.17	48.15
电阻系数 ρ/$\mu\Omega$·m	0.140	0.195
电阻温度系数 α_p (20～100℃)/K^{-1}	0.004 2	0.003 6
(20～1 000℃)/K^{-1}	—	0.002 4

续表 5.6-4

性　　能	合　　金	
	NMn3	NMn5
弹性模量 E/MPa	210 000	210 000
抗拉强度 σ_b/MPa	490（软态） 980(硬态,加工率 80%)	539～646 (热轧棒)
比例极限 σ_p/MPa	137	166
屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	160～215 (热轧棒)	176～235 (热轧棒)
伸长率 δ/%	40（软态）　2（硬态,加工率 80%）	40～45 (热轧棒)
布氏硬度 HB	140	147
显微组织	单相固溶体	单相固溶体

表 5.6-5　冶标规定的电真空用镍及镍合金产品力学性能

产品名称	代号	制造方法	状态	厚度或直径/mm	抗拉强度 σ_b/MPa ≥	伸长率 δ/% ≥	技术条件
镍合金板、带	NSi0.19 NSi0.2 NMg0.1	热轧	—	5～14	392	15	YB 703
		冷轧	软	板：0.5～10 带：0.5～1.2	392	35	
			硬		540	2	
电真空用镍合金带	DN NSi0.19 NMg0.1 DNMg0.06	冷轧	软	0.3～2.5	392	30	YB 757
			硬		540	2	
镍合金薄壁管	DN	拉制	软	0.3～18	392	35	YB 758
			硬		540	—	
	NSi0.19 NMg0.1 DNMg0.06	拉制	软	0.3～18	440	20	
			1/2 硬		540	6	
			硬		588	—	
镍合金棒	DN NSi0.19 NMg0.1 DNMg0.06	挤压		50～120	实测	实测	YB 759
		拉制		6～45			
镍合金线	DN NSi0.19 NMg0.1 DNMg0.06		软	0.03～0.20	421	8	YB 564
				0.21～0.48	421	20	
				0.50～1.00	392	25	
				1.05～8.00	372	26	
			1/2 硬	0.10～0.50	784～980	—	
				0.53～1.00	686～833	—	
				1.05～5.00	539～686	—	
			硬	0.03～0.09	882～1 323	—	
				0.10～0.50	833～1 078	—	
				0.53～1.00	735～980	—	
				1.05～5.00	686～882	—	
				5.3～8.0	588～833	—	

表 5.6-6　冶标规定的电真空用镍及镍合金带材的杯突试验

产品名称	代号	状态	厚度 /mm	冲头半径/mm	杯突深度/mm	技术条件
镍合金带	DN NSi0.19 NSi0.2 NMg0.1 DNMg0.06	软	0.1～0.25 0.30～0.55 0.60～1.20	10	7.5 8.0 8.5	YB 703 YB 757

2　热电偶用镍合金

热电偶是工业上应用十分广泛的测温元件，它是由两种具有优良热电特性的热电极材料配对制作而成的。两种热电极材料，一种是正热电极材料，另一种为负热电极材料，配对后一端焊接在一起为热端，另一端（冷端）则与测量仪表连接。这两种热电极材料都具有因两端温度不同而产生较大的电动势，称为热电势。从理论上说，任何两种导体都可以配对成热电偶，但是作为能够实用的测温元件，对热电极材料必需具有以下几点基本要求。

1）热电极材料的热电动势应该足够大，并随温度变化而呈直线变化。两种电极材料配对成热电偶后，就具有足够大的热电势，而且其热电势随温度而变化的速率要大，以保证热电偶有较高的灵敏度。

2）热电极材料的熔点应比较高，通常应高于其使用温度 100～150℃。

3）热电极材料应具有良好的抗高温氧化性能、抗多种环境介质的腐蚀性能。

4）热电极材料的热电势特性在长期使用中应该稳定不变，通常要求使用 1 000 h 后，热电势的变化不能超过 0.75%。

5）在批量生产时，热电极材料的热电势特性应具有良好的可重现性，所以对成分、杂质的控制必需严格。

6）热电极材料应具有良好的加工性能和足够的力学性能，易于拉制成丝材。

用不同热电极材料配对成的热电偶有很多种，工业上广泛应用的热电偶有 15 种，我国已制定国标的有 12 种，其中用镍合金配对的有：镍铬-镍锰、镍铬-镍硅、镍铬硅-镍硅镁、改良型镍铬-镍硅、镍钴-镍铝、镍铬-康铜。这些热电偶在工业上应用广泛。

2.1　镍基热电极合金的化学成分

制作上述热电偶的热电极材料的牌号与化学成分见表 5.6-7。

不同配对的热电偶在使用中有最适宜的工作温度范围，并配以相应的补偿导线。有关镍合金热电极材料配对的热电偶的特性及相应的补偿导线见表 5.6-8。

表 5.6-7　镍基热电极合金的牌号与化学成分

合金牌号	合金代号	化学成分（质量分数）/%														
		主要成分						杂质　≤								
		Ni	Cr	Co	Si	Mn	Al	Fe	Mg	Pb	S	C	P	Bi	As	Sb
9 镍铬合金	NCr9	余量	8.5～9.5	—	≤0.20	—	—	0.40	0.05	0.002	0.02	0.30	0.003	0.002	0.002	0.002
10 镍铬合金	NCr10	余量	9.0～10.0	0.3～1.2	≤0.6	—	—	—	—	—	0.02	0.02	0.005	—	—	—
2.5 镍硅合金	NSi2.5	余量	—	0.3～1.2	2.0～3.0	—	—	0.20	—	—	0.02	0.02	0.005	—	—	—
2－2－1 镍锰合金	NMn2－2－1	余量	—	0.3～1.2	1.0～2.5	1.5～3.0	1.2～2.2	0.20	—	—	0.02	0.02	0.005	—	—	—
17－2－2－1 镍钴合金	NCo17－2－2－1	余量	—	16～18	0.9～1.3	1.6～2.1	1.6～2.1	0.40	—	—	0.1	0.2	—	—	—	—
镍铬硅合金	NCr14.5Si1.5	余量	13.7～14.7	—	1.2～1.6	—	—	—	0.01	—	—	—	—	—	—	—
镍硅镁合金	NSi4.5Mg0.1	余量	≤0.02	—	4.2～4.6	—	Mg 0.5～1.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
镍铝合金	NAl3－1.5－1	余量	—	—	0.8～1.2	1.4～1.6	2.9～3.2	—	—	—	0.009	0.05	—	—	—	—

表 5.6-8　镍合金热电偶组合特性及补偿导线

热电偶						相应补偿导线			热电偶标准
(＋) | (－)	合金代号	工作温度范围/℃	与工作温度相应的电势 /mV	环境气氛	100℃时的电势 /mV	(＋) | (－)	合金代号	冷端为 0℃的电势热端为 100℃ /mV	
镍铬 | 镍锰	NCr10 | NMn2－2－1	300 | 1 000	12.21 | 41.32	氧化	4.10	铜 | 40－1.5 锰白铜	Cu（≥99.9%） | BMn40－1.5	4.16±0.15	GB/T 2614—1998
镍铬 | 镍硅	NCr10 | NSi2.5	300 | 1 000	12.21 | 41.32	氧化	4.10	铜 | 40－1.5 锰白铜	Cu（≥99.9%） | BMn40－1.5	4.16±0.15	GB/T 2614—1998

续表 5.6-8

热电偶						相应补偿导线			热电偶标准
(+) | (-)	合金代号	工作温度范围/℃	与工作温度相应的电势/mV	环境气氛	100℃时的电势/mV	(+) | (-)	合金代号	冷端为0℃的电势热端为100℃/mV	
改良型镍铬 镍硅	NCr10+0.05%Y | NSi2.5+0.05%Y	300 | 1 300	12.21 | 52.45	氧化	4.10	铜 | 40-1.5锰白铜	Cu (≥99.9%) | BMn40-1.5	4.16±0.15	—
镍钴 | 镍铝	NCo17-2-2-1 | NAl3-1.5-1	300 | 1 000	0.38 | 13.39	氧化	—	—	—	—	—
镍铬硅 | 镍硅镁	NCr14.5-Si1.5 | NSi4.5-Mg0.1	300 | 1 100	9.28 | 40.25	氧化	2.8	铜 | 40-1.5锰白铜	Cu (≥99.9%) | BMn40-1.5	2.81	GB/T 17615—1998

表中由镍基热电极合金配对的有四类热电偶：镍铬-镍硅（或镍锰）热电偶，称为K型热电偶；镍铬硅-镍硅镁热电偶称为N型热电偶；改良型镍铬-镍硅热电偶；镍钴-镍铝热电偶。

2.2 镍铬-镍硅（或镍锰）电热偶合金的特性

这类热电偶的特点是，热电势大，测温比较灵敏；热电势与温度的直线性好，测温比较准确；互换性强，便于更换使用；辐照效应小，在强中子流长期辐照下，成分变化不大，热电势比较稳定；合金抗高温氧化性好；加工性能好，易于加工成丝材；其测温范围比较宽，在300~1 100℃之间。因此这类热电偶在工业上应用非常广泛，是最典型、最基本的热电偶材料。

这类热电偶中镍铬合金是作为正热电极，镍锰合金和镍硅合金是作为负热电极材料。

由于含Cr8.5%~10%的镍铬合金具有最大的热电势。所以是通常选用的热电偶正极材料，NCr10合金中又加入了适量的硅和钴，硅可以调整合金的热电势，钴可以使合金热电势特性略为变直，硅、钴都对抗氧化性和热电势的稳定性有利，所以NCr10合金具有更好的综合性能。合金中铁、锰、铜、铝、镁、钛、碳都是有害杂质，应严格限制。

作为与镍铬合金配对的负热电极材料，镍锰合金、镍硅合金的化学成分见表5.6-7，合金中各元素含量的波动，都会对热电特性产生影响，实践表明，含2.7%Mn、1.3%Si、1.7%Al、0.8%C的镍锰合金（NMn2-2-1），其热电势特性符合标准规定；含2.6%Si、0.5%Co、0.4%Mn的镍硅合金综合性能良好，而且这两种负热电极材料的热电势与温度的关系几乎完全一致。

镍铬热电偶合金的物理力学性能见表5.6-9。

表5.6-9 镍铬热电偶合金的物理力学性能

性　能	数　据	备　注
熔点/℃	1 437	
密度/g·cm^{-3}	8.7	
线胀系数 α（0~100℃）/$10^{-6}K^{-1}$	12.8	
每米的热膨胀（200℃时）/mm	3	
（700℃时）/mm	12	
电阻率 $\rho/\mu\Omega\cdot m$	0.6~0.7	
电阻温度系数 α_p（0~100℃）/K^{-1}	0.000 48	
抗拉强度 σ_b/MPa	588~686	软态
	1 078	硬态，加工率80%

续表 5.6-9

性　能	数　据	备　注
伸长率 δ/%	35~45	软态
	3	硬态
布氏硬度HB	150~200	软态
	300	硬态
磁性	无磁性	

镍锰合金NMn2-2-1合金的物理、力学性能见表5.6-10。

表5.6-10 NMn2-2-1合金的物理、力学性能

性　能	数　据	备　注
熔点/℃	1 430~1 450	
密度/g·cm^{-3}	8.5	
电阻率 $\rho/\mu\Omega\cdot m$	0.25~0.35	
电阻温度系数 α_p/K^{-1}	0.002 7~0.000 44	
抗拉强度 σ_b/MPa	548	软态
	1 078	硬态，加工率80%
伸长率 δ/%	36	软态
	2	硬态
布氏硬度HB	130	软态
	250~300	硬态
磁性	有磁性	

对于镍铬—镍硅热电偶（K型热电偶）的连续使用温度，还应考虑合金丝直径的大小，一般丝的直径越小，连续使用的温度应越低。表5.6-11中列出了一个使用温度与热电偶丝直径关系的参考数据。

当参考端温度为0℃时，K型热电偶的主要温度点的热电势见表5.6-12。

2.3 镍铬硅-镍硅镁热电偶合金的特性

NCr14.5Si1.5热电极合金是在NCr10合金基础上改进的热电极合金，其铬含量提高到14.5%，硅含量提高到1.4%，不仅消除了NCr10合金在250~550℃温度范围内的热电势不稳定的缺点，而且也提高了合金的抗氧化性和热稳定性。NSi4.5Mg0.1合金的硅含量提高到4.5%，抗氧化性能也提高了，还使磁性转变温度降低到室温以下。

表 5.6-11　在空气中 K 型热电偶使用温度与丝径关系的参数数据

电偶丝直径 /mm	连续使用时最高工作温度/℃		
	短期（100 h）	长期（1 000 h）	特长期（10 000 h）
5.0	1 250	1 100	950
3.2	1 200	1 050	900
1.5	1 150	1 000	850
1.2	1 100	950	800
0.7	1 050	900	750
0.5	1 000	850	700
0.3	900	750	600
0.2	850	700	550

由 NCr14.5Si1.5 合金与 NSi4.5Mg0.1 合金配对的热电偶（N 型热电偶），其主要温度点（参考端温度为 0℃）的热电势见表 5.6-13。

N 型热电偶合金的主要物理、力学性能见表 5.6-14。

2.4　改良型镍铬－镍硅热电偶合金的特性

上述传统型镍铬－镍硅（或镍锰）热电偶最高使用温度为 1 100℃，当温度再高时，其热电势不稳定，同时合金的氧化烧损较快，热电偶丝易于断裂。因此要求测量更高温度时，需用贵金属铂铑－铂热电偶。为了提高镍铬－镍硅热电偶的使用温度，以部分代用贵金属，人们研究了在镍铬、镍硅合金中加入适当的钇、钙和稀土可以使镍铬－镍硅热电偶使用温度提高到 1 300℃，这种热电偶称为改良型镍铬－镍硅热电偶，其成分见表 5.6-15。

表 5.6-12　K 型热电偶主要温度点的热电势

测量端温度 /℃	热电动势标称值 /μV	Ⅰ级/μV		Ⅱ级/μV		Ⅲ级/μV	
		允差	热电动势范围	允差	热电动势范围	允差	热电动势范围
-196	-5 829					±47	-5 876～-5 782
-79	-2 887					±82	-2 969～-2 805
100	4 096	±62	4 034～4 158	±103	3 993～4 199		
200	8 138	±60	8 078～8 198	±100	8 038～8 238		
300	12 209	±62	12 147～12 271	±104	12 105～12 313		
400	16 397	±68	16 329～16 465	±127	16 270～16 524		
500	20 644	±85	20 559～20 729	±160	20 484～20 804		
600	24 905	±102	24 803～25 007	±191	24 714～25 096		
700	29 129	±117	29 012～29 246	±220	28 909～29 349		
800	33 275	±131	33 144～33 406	±246	33 029～33 521		
900	37 326	±144	37 182～37 470	±270	37 056～37 596		
1 000	41 276	±156	41 120～41 432	±292	40 984～41 568		
1 100	45 119	±167	44 952～45 286	±312	44 807～45 431		
1 200	48 838			±328	48 510～49 166		
1 300	52 410			±340	52 070～52 750		

表 5.6-13　N 型热电偶主要温度点的热电势

测量端温度 /℃	热电动势标称值 /μV	Ⅰ级/μV		Ⅱ级/μV		Ⅲ级/μV	
		允差	热电动势范围	允差	热电动势范围	允差	热电动势范围
-196	-3 950					±31	-3 919～-3 981
-79	-1 950					±56	-1 894～-2 006
100	2 774	±44	2 730～2 818	±74	2 700～2 848		
200	5 913	±49	5 864～5 962	±82	5 831～5 995		
300	9 341	±53	9 288～9 394	±88	9 253～9 429		
400	12 974	±59	12 915～13 033	±110	12 864～13 084		
500	16 748	±76	16 672～16 824	±143	16 605～16 891		
600	20 613	±94	20 519～20 707	±175	20 438～20 788		
700	24 527	±110	24 417～24 637	±206	24 321～24 733		
800	28 455	±126	29 329～28 581	±236	28 219～28 691		
900	32 371	±140	32 231～32 511	±263	32 108～32 634		
1 000	36 256	±154	36 102～36 410	±289	35 967～36 545		
1 100	40 087	±167	39 920～40 254	±313	39 774～40 400		
1 200	42 846			±334	43 512～44 180		
1 300	47 477			±352	47 125～47 829		

表 5.6-14　N 型热电偶合金的主要物理、力学性能

性　　能	NCr14.5Si1.5 合金	NSi4.5Mg0.1 合金
熔点/℃	1 410	1 340
密度/$g \cdot cm^{-3}$	8.5	8.6
在 20℃时的电阻率/$\mu\Omega \cdot m$	1.00	0.33
在 0～1 200℃范围内平均电阻温度系数/$10^{-4}K^{-1}$	0.78	14.9
抗拉强度 σ_b/MPa	≥620	≥550
伸长率（L_0 = 100 mm）/%	≥30	≥35

表 5.6-15　改良型镍铬－镍硅热电偶合金的化学成分

合金名称		化学成分（质量分数）/%							
		Ni	Cr	Co	Si	Mn	Y	Ca	RE
加钇的镍铬－镍硅热电偶	镍铬	余	9.3	0.8	0.2	—	0.05	—	—
	镍硅	余	—	0.5	2.6	0.4	0.05	—	—
加钙和稀土的镍铬－镍硅热电偶	镍铬	余	10	0.7	0.36	—	—	0.05	0.05
	镍硅	余	—	0.32	2.5	0.6	—	0.05	0.05

NCr10、NSi2.5 合金中加入钇，提高了合金在 1 300℃高温下热电势的稳定性，并显著提高了合金的抗氧化性。表 5.6-16 和表 5.6-17 分别表示钇对 NCr10、NSi2.5 合金高温热电势和抗氧化能力的影响。

表 5.6-16　钇对 NCr10 合金单极热电势稳定性及抗氧化能力的影响

材料及试验条件	热电势变化/mV	丝径减小率/%
NCr10 + 0.05Y，1 300℃ 331 h	−0.349	7.8
NCr10 未加 Y，1 300℃ 100 h	−0.342	15.7

表 5.6-17　钇对 NSi2.5 合金单极热电势及抗氧化的影响

材料及试验条件	热电势变化/mV	丝径减小率/%
NSi2.5 + 0.05Y，1 300℃ 331 h	+0.353	6.2
NSi2.5 未加 Y，1 300℃ 331 h	+0.547～+0.720	20

NCr10、NSi2.5 合金加入 Ca 和稀土，同样也改善合金在高温下的热电势稳定性和抗氧化能力，在 1 300℃连续加热 200 h 以上，其热电势变化小于 1%。用改良型镍铬、镍硅热电偶不需更改原用于镍铬-镍硅热电偶的仪表来测量至 1 300℃以下的温度，使用方便，在 1 100～1 300℃温度范围内测温可代替铂铑-铂热电偶，降低了消耗成本。

2.5　镍钴-镍铝热电偶

这种热电偶的测温范围为 300～1 100℃，其最大特点是 300℃以下使用时不需采用补偿导线。由于镍钴合金含钴较高，钴比较昂贵，同时其热电势值也较小，灵敏度较低（100℃时仅为 20 mV/℃），而且热电势不够稳定，复现性较差，生产中对成分和生产工艺控制都要求严格。现在这类热电偶应用比较少。

3　镍基弹性合金

弹性合金是一种重要的功能材料，它广泛应用于制造仪器仪表、自动化装置和精密机械中的各种弹性元件，例如各种弹簧、膜片、膜盒、波纹管，各种仪表游丝、张丝、电子测力仪、音叉以及其他利用弹性作用的敏感元件。

由于弹性合金用途广泛，工作条件多样化，所以除了要求有良好的弹性性能外，根据各种使用条件的不同，同时还要求有良好的耐腐蚀、无磁性（或铁磁性）、高的导电性、恒定的线胀系数、低的弹性模量温度系数、与铜的接触电阻小、热电势小等各种特性。弹性合金应用的日益多样化，常常要求弹性合金具有弹性和其他特性能同时满足一定标准的综合性能。

合金的弹性是它在外力作用下其原子偏离平衡位置、外力作用消失后原子又回到原来平衡位置，在宏观上表现为材料在加载时产生一定的变形、卸载后这个变形消失，材料回复到原来尺寸。这种卸载后又恢复的变形，称为弹性变形。

衡量弹性合金弹性特点的主要性能参数有：

1）弹性模量　表示材料对弹性变形的抗力。它是表示原子间的结合力，对材料组织不敏感。

弹性模量有弹性模量 E，表示材料抵抗正应变的能力，$E = \sigma/\varepsilon$（MPa），ε 为正应变，σ 为正应力。还有切变模量 G，表示材料抵抗切应变的能力。$G = \tau/\gamma$（MPa），τ 为切应力，γ 为切应变。E 与 G 之间存在 $E = 2G(1+\mu)$ 关系，μ 为泊松比，表示材料纵向变形与横向变形之间的关系。μ 值一般为 1/3～1/4。

弹性模量与元件截面积的乘积称之为元件的刚度，材料的弹性模量越高，元件刚度越大，越不容易发生弹性变形。

2）弹性极限 σ_e　表示卸载后不产生残余塑性变形的最大应力。它表征金属产生纯弹性变形的能力。由于实际测量中最大的纯弹性变形难以精确测量，所以工程上常用设定的一个很小的残余变形值，例如 0.005% 的应力来代表弹性极限，称之为条件弹性极限，记为 $\sigma_{0.005}$。条件弹性极限实际上是表征材料微塑性变形抗力的指标，它是组织结构敏感的。

3）弹性模量温度系数 β_E 或 β_G　弹性模量 E 或切变模量 G 都会随温度而变化的。用弹性模量温度系数 β_E（或 β_G）来表示温度变化 1℃时弹性模量的相对变化值，所谓恒弹性合金就是 β_E（或 β_G）值很小的合金。

弹性合金的种类牌号很多，涉及的领域很广，分类的方法也很多，按性能特点可分为高弹性合金和恒弹性合金两大类，但考虑弹性合金的其他特性则可分高温弹性合金、耐蚀弹性合金、无磁弹性合金、铁磁弹性合金、高导电弹性合金等。按合金的成分特点分类类别也很多，如马氏体时效钢、不锈钢、铜合金、镍合金、钴合金等等。本章只简要介绍镍基弹性合金，其余更详细的资料可参阅本大典第 3 卷。

3.1　镍基高导电高弹性合金——镍铍合金

镍铍合金具有高弹性、高导电性、高强度等特点，是良好的导电弹性材料。我国研制镍铍弹性合金起步较晚，从 20 世纪 70 年代开始研究 NiBe2 合金，后来在 NiBe2 基础上加入 Ti、Co、W 等元素。加入 Ti 提高了合金的疲劳强度和耐蚀性，加入 Co、W 提高了合金的强度和耐热性，先后开发了几种镍铍合金，其成分如表 5.6-18。有的尚未列入国家标准。

表 5.6-18　镍铍弹性合金的牌号与化学成分

合金名称	合金牌号	化学成分（质量分数）/%				
		Ni	Be	Ti	Co	W
NiBe2	3J31	余量	2	—	—	—
NiBe2Ti	3J32	余量	2	0.5	—	—
NiBe2Co3W6	—	余量	1.5～1.9	—	2.5～4.0	5.5～6.9
NiBe2Co3W8	—	余量	1.5～1.9	—	2.5～4.0	7.0～9.0

镍铍弹性合金与铜铍合金相比，弹性模量、弹性极限和强度都显著提高，导电性稍低，但电阻温度系数较低，使用温度较高。镍铍合金可用于制造工作温度较高的重要的导电弹性元件。

镍铍弹性合金的主要力学性能见表5.6-19。

3.2　镍基高温高弹性合金

镍基高温高弹性合金都是在沉淀强化型镍基变形高温合金的基础上开发出来的，有些牌号的高温合金就是高温高弹性合金，见美国的 Inconel 718（我国牌号 GH4169），有的则对成分作了一些调整，特别是加入了较多的 Nb。美国、俄罗斯和日本的部分高温高弹性合金的牌号和化学成分见表5.6-20。我国从20世纪70年代前后就开始仿制了几种俄罗斯牌号的合金，如ЭЛ578、70HXБMBЮ等。

表5.6-20中列出的美国、俄罗斯和日本的镍基高温高弹性合金的主要性能和相应热处理制度见表5.6-21。

表 5.6-19　镍铍弹性合金的主要力学性能

合　金	状　态	弹性模量 E/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	弹性极限 $\sigma_{0.005}$/MPa	硬度 HV
NiBe2	1 020 ~ 1 050℃淬火	194 000	784 ~ 804	313 ~ 329	—	< 250
	1 020 ~ 1 050℃淬火 + 500 ~ 520℃，3 h，时效	196 000	1 667 ~ 1 795	1 393 ~ 1 461	883 ~ 1 079	500
NiBe2Ti	1 020 ~ 1 050℃淬火 + 500℃，3 h，时效	196 000	1 765	1 471	1 080	500
NiBe2Co3W6	1 060℃淬火 + 冷变形 + 600℃时效	196 000 ~ 206 000	1 814	1 618	1 100	500
NiBe2Co3W8	1 060℃淬火 + 冷变形 + 600℃时效	196 000 ~ 206 000	1 814	1 618	1 100	500

表 5.6-20　美国、俄罗斯和日本部分镍基高温高弹性合金的牌号与化学成分

合金牌号与国别	化学成分（质量分数）/%										
	Ni	C	Cr	Nb	Mo	W	Co	Ti	Al	Fe	其他
Inconel 706（美）	余量	≤0.06	14 ~ 17	2.5 ~ 3.5	—	—	—	1.5 ~ 2.0	0.35	38 ~ 43	B，< 0.006
Inconel 718（美）	余量	≤0.08	17 ~ 21	4.5 ~ 5.5	2.8 ~ 3.3	—	—	0.5 ~ 1.2	0.2 ~ 0.6	16 ~ 21	B，< 0.006
Wasploy（美）	余量	0.04 ~ 0.10	18 ~ 21	—	3.5 ~ 5.5	—	12 ~ 15	2.5 ~ 3.5	1.2 ~ 1.6	≤2.0	Zr≤0.08
ЭЛ578（俄）	余量	< 0.05	18 ~ 20	—	—	9 ~ 10.5	5.5 ~ 6.5	2.75 ~ 3.25	1.3 ~ 1.8	—	B < 0.01
70HX6MBЮ（俄）	余量	≤0.06	14 ~ 16	9 ~ 10	3 ~ 4	1.7 ~ 2.3	—	—	0.6 ~ 1.1	—	B < 0.05
60HX6MBЮ（俄）	余量	≤0.06	24 ~ 26	8 ~ 9	3 ~ 4	1.7 ~ 2.3	—	—	0.5 ~ 1.0	—	—
70HX6MЮ（俄）	余量	≤0.06	14 ~ 16	9.5 ~ 10.5	4 ~ 6	—	—	—	1.0 ~ 1.5	—	—
Inconelx - 750（日）	余量	≤0.08	14 ~ 17	0.7 ~ 1.2	—	5 ~ 25	—	2.35 ~ 2.75	0.4 ~ 1.0	5 ~ 9	—
NiCoWMoCr（日）	余量	≤0.05	1 ~ 8	—	—	—	10 ~ 25	—	—	—	Cu，≤0.5

表 5.6-21　部分镍基高温高弹性合金的性能

合　金	热处理状态	弹性模量 E/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	弹性极限 σ_e/MPa	伸长率 δ/%	硬度	使用温度 /℃
Inconel 706	980℃ 1 h空冷 + 840℃ 3 h空冷 + 720℃ 8 h + 55℃/h 冷至 620℃8 h，空冷	192 000	1 379	981	18		600
Inconel 718	980℃ 1 h空冷 + 720℃ 8 h + 55℃/h 冷至 620℃空冷	223 000	1 450	1 186	4	490HV	600
Wasploy	1 080℃ 4 h空冷 + 845℃ 24 h空冷 + 760℃ 16 h空冷	210 000	1 320	700	25		600
ЭЛ578	1 160℃水冷 + 30%冷变形 + 800℃1 h + 700℃ 2 h空冷	211 000	1 520	1 128	4		500
70HXБMBЮ	1 150℃水冷 + 750℃ 5 h空冷	216 000	1 569	1 128	11	48HRC	550
60HXБMBЮ	1 150℃水冷 + 750℃ 5 h空冷	206 000	1 422	1 128	10	46HRC	550
70X6MЮ	1 150℃水冷 + 750℃ 5 h空冷	216 000	1 520	1 128	4	47HRC	550
Inconel × - 750	1 150℃ 2 h空冷 + 840℃ 24 h空冷 + 705℃ 20 h空冷	215 000	1 300		24	40HRC	600
NiCoWMoCr	90%冷加工 + 时效	226 000	2 746	1 569	—	735HV	—

3.3 镍基耐蚀高弹性合金

我国已研制成了Ni-Mo系和Ni-Mo-Cr系两个耐腐蚀高弹性合金，并列入JB/T 5329—1991。分别用于含有盐酸等还原性介质或各种在湿氯、氯化物、卤化物介质中工作的弹性敏感元件，合金的化学成分见表5.6-22。

合金在不同状态下的弹性与力学性能见表5.6-23。

表5.6-22 镍基耐蚀高弹性合金的牌号与化学成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%										
	Ni	Mo	Cr	Mn	W	Fe	V	Si	C	P	S
00Ni70Mo28V	余量	28~30	—	0.4~0.8	—	≤1.0	0.3~0.5	—	≤0.02	≤0.03	≤0.03
00Ni60Cr15Mo16W4	余量	15~17	14.5~16.5	≤1.0	3.0~4.5	4.0~7.0	≤0.35	≤0.08	≤0.02	≤0.04	≤0.03

表5.6-23 镍基耐蚀高弹性合金的性能

合金牌号	加工热处理状态	弹性模量 E/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	弹性极限 σ_{be}/MPa	伸长率 δ/%	硬度 HV
		≥				
00Ni70Mo28V	1 100~1 180℃快冷固溶	195 000	900	550	47	220
	50%冷加工	195 000	1 300	680	3	400
	11~14%冷加工	195 000	1 000	310	20	300
00Ni60Cr15Mo16W4	1 150~1 200℃快冷固溶	195 000	810	460	45	190
	50%冷加工	190 000	1 400	480	3	380
	11~14%冷加工	190 000	920	350	25	260

4 镍基膨胀合金

众所周知，热胀冷缩是材料的普遍特性。对于不同的金属和合金，热胀冷缩的特性是不同的。通常都采用膨胀系数来表征材料的热膨胀特性，而工程上一般是采用平均线胀系数$\bar{\alpha}_{T_1-T_2}$来表示。$\bar{\alpha}_{T_1-T_2}$是指温度由T_1升高至T_2时，每升高1℃试样长度L的相对伸长

即
$$\bar{\alpha}_{T_1-T_2}=\frac{L_2-L_1}{L_1}\times\frac{1}{T_2-T_1}$$

式中，L_1为温度为T_1时试样的长度；L_2为温度为T_2时试样的长度。

一般金属的膨胀系数随熔点的升高而减小，单相二元固溶体合金的膨胀系数介于两组元之间，呈近似直线规律，多相合金的膨胀系数主要取决于组成相的本性与含量。

绝大多数金属与合金，随温度升高，初期膨胀系数增加很快，以后逐渐趋于平缓，这种情况属于正常热膨胀。但某些金属和合金不符合上述规律，例如镍，在居里点附近膨胀系数显著增大，称为正反常；而Fe-Ni 35%（摩尔分数）合金，在其居里点附近膨胀系数显著减小，称为负反常，如图5.6-1。这种合金就是有名的因瓦合金。

自从发现因瓦合金的反常膨胀现象以后，人们在真空技术发展的推动下，相继研究开发了能与玻璃、陶瓷等封接的、具有特殊膨胀性能的合金，包括低膨胀合金（因瓦合金），它在-60~100℃温度范围内，线胀系数低于3×10^{-6}/℃；定膨胀合金，它在-70~500℃温度范围内，具有比较恒定的中等膨胀系数。

我国20世纪50年代开始试制因瓦合金，目前已有数十种低膨胀、定膨胀合金用于生产，并列入部标，这些膨胀合金大部分都是Fe-Ni基合金，本大典第2卷有详细介绍，本小节仅介绍几种镍基定膨胀合金，这几个合金主要用于电真空器件中的无磁瓷封材料和陀螺仪等，其牌号和化学成分见表5.6-24（根据YB/T 5233-1993）。

合金的平均线胀系数及磁导率等基本性能见表5.6-25、表5.6-26和表5.6-27。

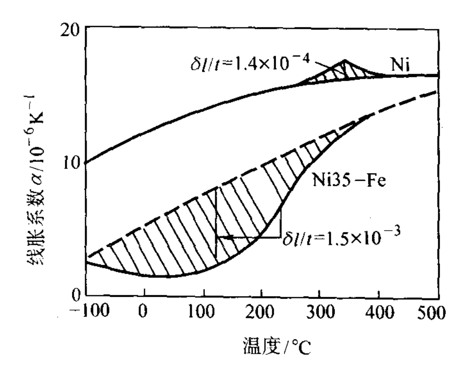


图5.6-1 Ni和Fe-Ni35%（摩尔分数）合金的膨胀系数α_T随温度变化曲线（图上虚线为正常热膨胀时α_T值，阴影区为反常热膨胀的范围和大小，箭头指居里点，$\delta l/l$代表最大反常的热膨胀量）

表5.6-24 镍基无磁定膨胀瓷封合金的牌号与成分

合金牌号	化学成分								
	Ni	Mo	W	Cu	C	P	S	Mn	Si
					≤				
4J78	余量	20.0~22.0	—	≤1.5	0.05	0.020	0.020	0.40	0.30
4J80	余量	9.5~11.5	9.5~11.5	1.5~2.5	0.05	0.020	0.020	0.40	0.30
4J82	余量	17.5~19.5	—	—	0.05	0.020	0.020	0.40	0.30

表5.6-25 4J78、4J80、4J82合金的平均线胀系数和磁导率

合金牌号	试样热处理制度	平均线胀系数 $\bar{\alpha}/10^{-6}K^{-1}$		磁导率 μ_{200} /μH·m⁻¹
		20~500℃	20~600℃	
4J78	在保护气氛或真空中加热到1 000~1 050℃，保温30~40 min，以不大于300℃/h的速度冷却到300℃以下空冷	12.1~12.7	12.4~13.0	≤1.251 3

续表 5.6-25

合金牌号	试样热处理制度	平均线胀系数 $\bar{\alpha}/10^{-6}K^{-1}$		磁导率 μ_{200} /μH·m⁻¹
		20~500℃	20~600℃	
4J80	在保护气氛或真空中加热到850~900℃，保温30~40 min，以不大于300℃/h的速度冷却到300℃以下空冷	12.7~13.3	13.0~13.6	≤1.251 3
4J82	在保护气氛或真空中加热到1 000~1 050℃，保温30~40 min，以不大于300℃/h的速度冷却到300℃以下空冷	12.5~13.1	13.0~13.6	≤1.251 3

表 5.6-26 4J78、4J80、4J82 合金在不同温度范围的平均线胀系数

合金牌号	不同温度范围内的平均线胀系数 $\bar{\alpha}/10^{-6}K^{-1}$										
	20~100℃	20~200℃	20~300℃	20~400℃	20~500℃	20~600℃	20~700℃	20~800℃	20~900℃	20~1 000℃	20~1 050℃
4J78	11.3	11.6	11.8	12.1	12.4	12.5	13.2	13.7	14.2	14.7	15.0
4J80	11.6	11.9	12.4	12.7	13.0	13.0	—	—	—	—	—
4J82	11.3	11.6	11.9	12.3	12.7	13.1	—	—	—	—	—

表 5.6-27 4J78、4J80、4J82 合金的直流磁导率

合金牌号	不同磁场强度下的磁导率 μ/μH·m⁻¹						
	4 kA/m	8 kA/m	12 kA/m	16 kA/m	32 kA/m	40 kA/m	80 kA/m
4J78	1.250 65	1.250 68	1.250 66	1.250 65	1.250 64	1.250 53	1.250 43
4J80	1.250 84	1.250 84	—	1.250 66	—	1.250 68	1.250 73
4J82	—	1.250 66	—	1.250 68	1.250 65	1.250 66	1.250 65

这类无磁定膨胀合金的力学性能和其他物理性能如表5.6-28和表5.6-29。

表 5.6-28 4J78、4J80、4J82 合金的力学性能

合金牌号	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 σ_s/MPa	弹性模量 E/MPa	伸长率(L_0=50 mm)/%	杯突值 /mm
4J78	868.3	352.8	221 676	54	12.6
4J80	748.7	289.1	220 500	55	12.6
4J82	784	318.5	215 600	53	12.6

表 5.6-29 4J78、4J80、4J82 合金的物理性能

合金牌号	电阻率 ρ /μΩ·m	密度 /g·cm⁻³	热导率 λ/W·(m·K)⁻¹		
			20℃	300℃	600℃
4J78	1.17	9.38	13.81	15.49	16.74
4J80	0.88	9.67	15.49	16.74	21.35
4J82	1.00	9.23	15.90	17.16	21.77

此外我国还开发了一个 Fe-Ni 二元定膨胀合金 4J58，按 YB/T 5238-1993 规定，4J58 定胀合金专门用于制作线纹尺，其化学成分见表 5.6-30。

表 5.6-30 4J58 合金的化学成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%						
	Ni	Fe	C	P	S	Mn	Si
			≤				
4J58	57.5~59.5	余	0.03	0.015	0.015	0.60	0.25

4J58 合金在氢气或真空中加热到 900℃±20℃，保温 1 h，以不大于 5℃/min 速度冷却至 200℃以下空冷，其 20~100℃范围的平均线胀系数 $\bar{\alpha}$ 为 $11.4\sim11.9\times10^{-6}K^{-1}$。4J58 合金在不同温度范围的平均线胀系数见表 5.6-31。

表 5.6-31 4J58 合金不同温度范围平均线胀系数

合金牌号	平均线胀系数 $\bar{\alpha}/10^{-6}K^{-1}$						
	20~100℃	20~200℃	20~300℃	20~400℃	20~500℃	20~600℃	20~700℃
4J58	10.6	11.3	11.5	11.7	11.9	12.1	12.3

5 火花塞电极镍合金

火花塞电极是汽车发动机的重要零件，要求耐高温气体腐蚀和耐电火花烧蚀，并有良好导热性、适当的强度和硬度，易于加工成形。国外都是采用镍基合金，其牌号和化学成分见表 5.6-32。目前我国尚未将这种合金列入国家标准。

表 5.6-32 国外商用火花塞电极镍基合金的牌号与成分

合金牌号		化学成分（质量分数）/%						
合金牌号	商品名称	Ni	Cr	Fe	Mn	Si	C	其他
836	Nicrofer 7615	77	15	7.5	0.3	0.3	0.01	—
522	Nickel-Chrom-2 Mangan	95	1.8	—	2	0.5	0.002	Zr, 0.15
	Nickel-Chrom-2 Mangan-Si	95	1.6	—	2	1.2	0.003	—

表中的 836 合金含 Cr 量较高，抗高温氧化腐蚀性能好，另两个合金的 Cr 含量和 C 含量都较低，合金的导热性好，冷加工成形性能好。火花塞电极合金的使用特性需要通过发动机试验来评估。

6 人造金刚石触媒用镍合金

超硬材料——人造金刚石的生产是通过高温高压将石墨直接转变为金刚石。石墨向金刚石的这种转变，只有在适当的触媒作用下，才可能在工业上易于实现的温度、压力下完成。实验表明，第Ⅷ族元素中的铁、钴、镍都可以作为人造金刚石的触媒。目前中国普遍采用六面顶压机，以 Ni75Mn25Co5 合金作触媒生产人造金刚石。触媒合金的使用效果只能通过合成试验作最终评估。一般合金成分和某些微量元素对合成的金刚石晶形、强度、颜色、产量以及合成工艺的稳定性产生影响。

编写：唐仁政（中南大学）
审稿：田荣璋（中南大学）

第7章 钴及钴合金

1 概述

钴在元素周期表中属第Ⅷ族元素，原子序数为27，在固态下具有同素异型转变，转变温度与钴的纯度有关，较高纯度钴的同素异型转变温度为427℃，427℃以下为密排六方结构的α-Co，427℃以上为面心立方结构的β-Co。

钴资源贫乏，价格比较昂贵。由于钴具有优良的耐热、耐腐蚀性以及优良的铁磁性等许多优异性能，所以钴在机电、化工、信息、航空航天等领域都有很重要的应用，钴是一种重要的战略金属。

钴的一些主要的物理性能见表5.7-1。

表5.7-1 钴的主要物理性能

物理性能名称	数 值
原子系数	27
相对原子质量	58.93
原子半径/nm	0.125 3
同素异型转变温度/℃	427
密排六方α-Co的晶格常数/nm	$a=0.250\ 71$，$c=0.468\ 6$
面心立方β-Co的晶格常数/nm	$a=0.354\ 4$
熔点/℃	149 5
沸点/℃	约2 900
密度（25℃时）/$g\cdot cm^{-3}$	8.832（α），8.80（β）
熔化潜热/$kJ\cdot kg^{-1}$	292
汽化潜热/$MJ\cdot kg^{-1}$	7.209
热导率（20℃时）/$W\cdot(m\cdot K)^{-1}$	69.04
电阻率（0~25℃）/$\mu\Omega\cdot m$	0.062 4
饱和磁感应强度/T	1.87
平均线胀系数（0~100℃）/$10^{-6}K^{-1}$	13.8
弹性模量/MPa	211 000
切变模量/MPa	82 600
泊松比	0.32

钴的化学性质比较稳定，抗腐蚀性能良好。在常温下，水、湿空气、碱及有机酸对钴都不起作用。钴在浓硝酸中被钝化，在稀硝酸、稀硫酸中都缓慢溶解，形成二价钴盐。

金属钴在常温下基本上不氧化，加热至300℃时，表面开始产生一层很薄的氧化物薄膜，加热至900℃，钴的氧化显著加速。但钴粉在加热时氧化激烈。

氢和氮都不直接与钴反应，钴粉在氨气中长期加热可生成氮化钴。钴与碳形成类似Fe_3C的碳化物Co_3C。

铬、钨、钼、锰在钴中的溶解度都比较大，镍、铁与钴无限互溶，这些元素加入钴中形成固溶体产生固溶强化。

铝和钛与钴可以分别形成有序体心立方的AlCo和有序面心立方的Co_3Ti化合物，它们都可以作为沉淀析出的强化相。

钴具有较高的力学性能，纯钴的抗拉强度可达600~700 MPa，退火状态的布氏硬度132HB，冷加工状态则可达280HB。钴基合金由于合金化程度高，热加工塑性较低，变形抗力较大，热加工温度范围很窄。

钴的工业应用主要包括：钢及非铁金属合金的合金化元素、钴基合金、硬质合金的黏结剂等。

钴还可以作为固体燃料氢化脱硫、原油加氢裂化和合成燃料的催化剂；钴对人体不仅无毒，还是人不可缺少的微量营养元素之一，有一种含钴的维生素可以用来防治人的恶性贫血病，钴的同位素^{60}Co可作为放射源，广泛用于放射化学、辐射照相、食品杀菌等。

钴合金主要有钴基高温合金、稀土钴永磁材料、钴基硬质耐磨耐蚀合金、钴基弹性合金、钴基低膨胀合金、钴基磁性记录合金等。

2 钴基高温合金

钴基高温合金在耐高温、抗热腐蚀和抗热疲劳性能方面都有优势。但由于我国钴资源很缺乏，价格也很昂贵，所以钴基合金的发展和应用受到一定的限制。

钴基高温合金一般都含有20%~30%Cr和10%~20%Ni，Cr在Co中的最大溶解度为38%，Ni与Co则无限互溶，Cr、Ni的加入除了保证合金的抗氧化和抗腐蚀性能以及固溶强化外，还大大降低其同素异型转变温度，稳定基体的面心立方结构、抑制了密排六方结构的形成。同时还加入7%~15%W固溶强化。此外钴基高温合金是以碳化物进行沉淀强化，所以碳含量比镍基高温合金高，变形钴基高温合金碳含量约为0.1%，铸造钴基高温合金碳含量达0.25%~0.5%。

2.1 变形钴基高温合金

我国已列入国家标准的变形钴基高温合金的牌号与化学成分见表5.7-2。

技术标准规定的变形钴基高温合金的拉伸性能和持久性能见表5.7-3、表5.7-4、表5.7-5。

表5.7-2 变形钴基高温合金的牌号与主要化学成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%										
	C	Co	Cr	Ni	W	Mo	Mn	Si	Fe	Nb	其他
GH5188	0.05~0.15	余量	20.0~24.0	20.0~24.0	13.0~15.0	—	≤1.25	0.20~0.50	≤3.0	—	B≤0.015 La0.03~0.12
GH159	≤0.04	34~38	18.0~20.0	余量	—	6~8	—	—	8~10	0.25~0.75	Al0.1~0.3 Ti2.5~3.25
GH605	0.05~0.15	余量	19.0~21.0	9.0~11.0	14.0~16.0	—	1.0~2.0	≤0.40	≤3.0	—	

表 5.7-3 GH5188 合金的拉伸性能与持久性能

品种	拉伸性能				持久性能				硬度 HV
	温度 /℃	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ_5/%	温度 /℃	应力 σ/MPa	断裂时间 /h	伸长率 δ_5/%	
		≥					≥		
中板	20	380	860	45	815 927	165 76	23 23	10 15	≤282
薄板	20 650	380 250	860 620	45 50	927	76	23	15	—
带材 δ≤0.51 mm	20 650	380 250	860 620	40 40	927	62	23	8	—
带材 δ>0.51 mm	20 650	380 250	860 620	45 50	927	76	23	15	—
棒材	20	380	860	45	927	90	23	15	HB≤302
锻件	20	380	860	45	927	83	23	15	HB≤293

表 5.7-4 GH519 合金的拉伸性能与持久性能

品种	状态	取样方向	拉伸性能					硬度 HRC	持久性能			
			温度 /℃	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ_5/%	断面收缩率 ψ/%		温度 /℃	应力 σ/MPa	断裂时间 /h	伸长率 δ_5/%
				≥								
冷拉棒材	冷拔+时效	纵向	室温	1 795	1 725	6	22	44	650	965	≥23	≥5
			595	1 415	1 310	5	15	—				

表 5.7-5 GH605 合金的拉伸性能与持久性能

品种	持久拉伸性能			硬度 HV	815℃持久性能			晶粒度 /级
	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ_5/%		应力 σ/MPa	断裂时间 /h	伸长率 δ_5/%	
中板、薄板、带材	≥890	370~550	≥35	≤290	165	≥24	≥10	≥2.5 (1)
冷硬带材 A级 B级	≥1 500 ≥1 700	≥1 300 ≥1 500	≥5 ≥3	410~480 485~560	—	—	—	≥9 ≥10
棒材	≥860	≥340	≥35	HB≤282	165	≥23	≥10	≥2 (0)
环形件	≥860	≥310	≥30	HB≤248	165	≥24	≥10	≥2 (0)

钴基高温合金主要是以碳化物沉淀强化，碳化物包括 Cr_7C_3、$M_{23}C_6$ 以及难熔金属的碳化 MC 和 M_6C，这些碳化物的固溶温度一般高于镍基合金中的 γ' 相和 γ'' 相，因此钴基高温合金固溶处理的温度也较高。

钴基变形高温合金的热处理制度为：GH5188 合金热轧板材，在 1 170~1 190℃固溶后空冷；冷轧带材和板材 1 165~1 230℃固溶后快速空冷，棒材和锻件在 1 180℃±10℃固溶后，快速空冷。GH159 合金在 1 040~1 055℃，4~8 h，水冷+室温下进行 48%±1%冷变形 650~675℃，4~4.5 h 时效后空冷。GH605 合金在 1 175~1 230℃固溶后，快速冷却。

钴基变形高温合金的有满意的加工成形性能，GH5188 合金热锻温度为 1 180℃，终锻温度不低于 980℃，当铸造组织破碎后，可以采用大变形量以细化晶粒。合金固溶处理后塑性良好，可以采用任何冷加工方法成形，冷变形量要注意避开临界变形度，最少应大于 12%，以免退火后产生粗大晶粒。

GH605 合金的热加工温度范围为 1 200~980℃，最适宜的热锻温度为 1 170℃，加热炉气氛应为中性或弱氧化性，加热保温时间为每 25 mm 保温 1 h，锻造后可以任意方式冷却，合金固溶状态可进行各种冷加工成形，但由于合金变形抗力大，加工硬化速率大，需要采用功率大的加工成形设备和多次中间退火。

GH159 合金热加工前铸锭应在 1 125~1 180℃保温 18~36 h 进行均匀化退火处理，以减少偏析和防止脆性 σ 相析出。合金锻造加热温度为 1 120℃±10℃，保温不小于 4 h，装料进炉温度不高于 600℃，开锻温度不低于 1 050℃，终锻温度不低于 950℃。热轧加热温度为 1 130℃±10℃，终轧温度不低于 950℃。装料进炉温度不高于 700℃，合金热轧后在 1 050~1 075℃退火保温 1 h，以获得均匀的晶粒，便于后续的冷加工。

钴基变形高温合金的焊接性能较好，均可用氩弧焊焊接。

2.2 钴基铸造高温合金

钴基铸造高温合金的合金化程度很高，含有25%～30% Cr，10%左右 Ni，7%左右 W，而且碳含量也高。合金是通过固溶强化和碳化物强化来提高其力学性能，合金同时具有良好的抗高温氧化和耐腐蚀性能，以及良好的冷热疲劳性能和铸造性能。我国只仿制了少数国外的钴基铸造高温合金，应用在燃气涡轮发动机的一些专用部件，以利用钴基高温合金的突出优点。我国列入标准的钴基铸造高温合金的牌号和成分见表 5.7-6。

表 5.7-6 钴基铸造高温合金的牌号与成分

合金牌号	主要化学成分（质量分数）/%									使用温度 /℃
	C	Co	Cr	Ni	W	Fe	Mn	Si	B	
K640	0.50	余	25.5	10.5	7.5	≤2.0	≤1.0	≤1.0	—	1 000
K644	0.25	余	29.5	10.5	7.0	≤2.0	≤1.0	≤1.0	0.01	900

上表中两种合金的持久性能如表 5.7-7 和表 5.7-8。

表 5.7-7 K640 合金的持久性能

试验温度 /℃	室温拉伸性能			
	应力 σ /MPa	断裂时间 /h	伸长率 δ/%	断面收缩率 ψ/%
650	392	842	6.6	5.0
	366	1 486	5.2	9.7
770	245	958	5.8	9.5
816	207	131	14.0	13.5
	178	341	8.8	8.2
	137	2 308	4.0	—
982	55	100	3.0	3.0

表 5.7-8 K644 合金的持久性能

试验温度 /℃	持久拉伸性能			
	应力 σ /MPa	断裂时间 /h	伸长率 δ/%	断面收缩率 ψ/%
815	150	157	30	—
	123	1 641	33.4	54.5
	98	>8 000	—	—
870	88	1 748	28.8	57
	68	>10 000	—	—
900	68	2 386	10	11.3
	49	8 221	5.6	8.5
982	55	339	11.2	11.5

K640合金相当于国外 X40 合金。合金的组织稳定，长期热处理也无拓扑密排相析出。合金的铸造性能良好，可铸成形态复杂的铸件。合金一般在铸态下使用，适于制作长寿命航空发动机的导向叶片、蜗轮叶片以及抗高温氧化的耐腐蚀部件。

K644 合金相当于国外 FS414 合金，是燃气轮机中应用广泛的合金，主要用于工作温度在 900℃以下的燃气轮机导向叶片。

3 钴基磁性材料

3.1 稀土钴（RCo）永磁合金

稀土金属元素与过渡族金属之间所形成的金属间化合物中，有一些具有十分优异的永磁性能，是目前工业上应用很多的一类永磁材料。这类永磁材料包括三种类型。第一类是最初发现的1:5型 RCo_5 系列，以 $SmCo_5$（SmPr）Co_5 为代表，称为第一代稀土永磁材料；第二类是 2:17 型 R_2Co_{17} 系列，以 Sm_2（Co、Cu、Fe、Zr)$_{17}$ 为代表，称为第二代稀土永磁材料；第三类是 RFeB 系列，以 $Nd_2Fe_{14}B$ 为代表称为第三代稀土永磁材料（通称钕铁硼永磁材料）。

第一代和第二代稀土永磁材料都是钴与稀土金属的化合物。对它的研究始于 1966 年，首先开发出了 $SmCo_5$ 合金，后来又发现用镨全部或部分取代钐，开发出镨钴（$PrCo_5$）、钐镨钴（SmPr Co_5）合金，具有更高的磁性能。由于纯钐和镨的价格都很高，因而相继研究开发了一系列价格较便宜的 RCo_5 型合金，如混合稀土钴合金 $MMCo_5$（MM 代表混合稀土）、（SmMM）Co_5、铈钴铜合金 Ce（Co、Cu、Fe)$_5$ 和 R（Co、Cu)$_5$ 等。后来又发现了 R_2Co_{17} 化合物系列的合金，它们的磁性能优于 RCo_5 型合金，成为第二代稀土永磁材料，如 Sm_2（Co、Cu、Fe、Er)$_{17}$，Sm_2（Co、Cu、Fe、Zr)$_{17}$ 等。

由于稀土钴永磁合金都是金属间化合物，性质很脆，所以稀土钴永磁体的制备，一般都是先制备一定粒度的磁粉，然后用烧结法或黏结法制成工业上应用的各种磁体。

我国已列入国标的稀土钴永磁合金有：$SmCo_5$、$MMCo_5$、(Sm Pr) Co_5、Ce（Co、Cu、Fe)$_5$。规定牌号表示方法是：

采用汉语拼音字母 XG 作前缀，表示稀土钴，S 表示烧结。

符号 XG S 后用阿拉伯数字分数，表示材料的磁性能，分子表示材料的最大磁能积（$(BH)_{max}$）的标称值，单位为 kJ/m^3；分母表示材料的磁极化强度矫顽力 H_{cJ}最小值的十分之一。单位为kA/m。最后如果数字后面还有一个字母 T，则表示为各向同性，数字后面没有字母则表示各向异性。例如：XGS180/50 表示稀土钴烧结磁体，$(BH)_{max}$ 的标称值为 180 kJ/m^3，H_{cJ}最小值为 500 kA/m，磁各向异性。

根据 GB/T 4180—2000 规定的稀土钴永磁合金的主要磁性能见表 5.7-9 和表 5.7-10。

黏结稀土钴永磁材料与烧结磁体相比，所用合金成分更接近化合物的化学计量成分以获得较好的磁性能。例如2:17型黏结磁体的成分为 Sm $(Co_{0.6}Cu_{0.08}Fe_{0.3}Zr_{0.02})_{8.35}$。表 5.7-11 为黏结稀土钴永磁材料的主要磁性能。

烧结稀土钴永磁材料的辅助磁性和主要物理力学性能见表 5.7-12。

烧结稀土钴永磁合金的最低饱和和磁化磁场强度见表 5.7-13。

3.2 钴基非晶态磁性材料

3.2.1 钴基非晶态软磁合金

非晶态软磁合金有铁基、铁镍基和钴基三个系列。钴基非晶态软磁合金有：Co－Ni－B 系和 Co－Fe－B 系。这类合金的磁致伸缩系数和各向异性常数都趋于零，因而具有很高的磁导率、高饱和磁感应强度，同时还具有高电阻率、高硬度、低损耗等优点。

这类合金通常都是采用快速冷凝方法制备。将熔融金属喷射到高速旋转的铜制辊轮表面，合金熔体以 116℃/s 以上的冷却速率冷凝成 10～100 μm 的薄带，由于离心力的作用薄带脱离辊轮表面而甩出，这种方法也简称甩带法，可连续生产一定宽度的薄带。

目前我国已有几家研究院所和工厂生产，其规格型号与技术指标见表 5.7-14（企业标准）。

表 5.7-9　Rco$_5$ 系列烧结稀土钴永磁合金的主要磁性能

品　种	材料牌号	IEC 分类代号	最大磁能积 $(HB)_{max}$ /kJ·m^{-3}	顽磁（剩磁）B_r /mT	矫顽力 H_{CB} /kA·m^{-1}	矫顽力 H_{CJ} /kA·m^{-1}	典型化合物
			范围	最小值	最小值	最小值	
低磁极化强度矫顽力	XGS80/36		65～90	600	320	360	Ce（Co，Cu，Fe）$_5$
	XGS100/80	R5－1－1	80～120	650	500	800	$MMCo_5$
	XGS135/96	R5－1－2	120～150	770	590	960	$SmCo_5$
	XGS165/80	R5－1－3	150～180	900	640	800	（Sm，Pr）Co_5
高磁极化强度矫顽力	XGS135/120		120～150	770	590	1 200	$SmCo_5$ 或（Sm，Pr）Co_5
	XGS135/160		120～150	770	590	1 600	
	XGS165/120		150～180	880	640	1 200	
	XGS165/145		150～180	880	640	1 450	

注：IEC 分类代号符合 IEC404－8－1 的规定，对应每一牌号材料的主要磁性能值除 $(BH)_{max}$ 增加范围上限外，其余与相应 IEC 分类代号对应值相同。

表 5.7-10　R_2Co_{17} 系列烧结稀土钴永磁材料主要磁性

品　种	材料牌号	IEC 分类代号	最大磁能积 $(HB)_{max}$ /kJ·m^{-3}	顽磁（剩磁）B_r /mT	矫顽力 H_{CB} /kA·m^{-1}	矫顽力 H_{CJ} /kA·m^{-1}	典型化合物
			范围	最小值	最小值	最小值	
低磁极化强度矫顽力	XGS180/50	R6－1－11	165～195	950	440	500	Sm_2（Co，Cu，Fe，Zr）$_{17}$
	XGS185/70	R5－1－12	170～200	970	630	700	
	XGS195/40		180～210	980	380	400	
	XGS195/90	R5－1－13	180～210	1 000	680	900	
	XGS205/45		190～220	1 000	420	450	
	XGS205/70	R5－1－14	190～220	1 050	560	700	
	XGS235/45		220～250	1 070	440	450	
高磁极化强度矫顽力	XGS205/120		190～220	1 000	650	1 200	
	XGS205/160		190～220	1 000	650	1 600	

表 5.7-11　黏结稀土钴永磁材料的主要磁性

品　种	材料牌号	IEC 分类代号	最大磁能积 $(HB)_{max}$ /kJ·m^{-3}	顽磁（剩磁）B_r /mT	矫顽力 H_{CB} /kA·m^{-1}	矫顽力 H_{CJ} /kA·m^{-1}	典型化合物
			范围	最小值	最小值	最小值	
低磁极化强度矫顽力	XG65/60	R5－3－1	48～80	500	360	600	$SmCo_5$ 或 Sm_2（Co，Cu，Fe，Zr）$_{17}$

表 5.7-12　烧结稀土钴永磁材料的辅助磁性和主要物理力学性能

参数名称		单位	RCo_5		R_2Co_{17}
			Ce（Co，Cu，Fe）$_5$	$SmCo_5$、（Sm，Pr）Co_5	Sm_2(Co,Cu,Fe,Zr)$_{17}$
辅助磁性能	顽磁（剩磁）温度系数	$10^{-2}K^{-1}$	－0.09	－0.05	－0.03
	磁极化强度矫顽力温度系数	$10^{-2}K^{-1}$		－0.3	－0.3
	居里温度 T_c	K	750	1 000	1 100
	回复磁导率 μ_{rec}	—	1.10	1.05	1.10
力学物理特性	密度	g/cm^3	7.8	8.2	8.4
	维氏硬度 HV	MPa	450	450	600
	电阻率 ρ	Ω·cm	5×10^{-4}	5.3×10^{-5}	8.5×10^{-5}
	抗压强度 σ_c	MPa		1 000	800
	抗拉强度 σ_b	MPa		400	350
	抗弯强度	MPa		180	150

表 5.7-13 烧结稀土钴永磁合金的最低饱和和磁化磁场强度

典型化合物	$SmCo_5$	$Sm_2(Co, Cu, Fe, Zr)_{17}$	$Sm_2(Co, Cu, Fe, Zr)_{17}$	(Sm, Pr) Co_5	Ce (Co, Cu, Fe)$_5$
		$H_{CJ} \geq 800$ kA/m 时	$H_{CJ} < 800$ kA/m 时		
最低饱和磁化磁场强度 H	3 200 kA/m	3 200 kA/m	1 600 kA/m	2 400 kA/m	1 600 kA/m

表 5.7-14 钴基非晶态软磁合金薄带的组成与技术指标

合金成分	B_s /T	H_e /A·m^{-1}	λ_s /10^{-6}	ρ /μΩ·cm	T_c /℃	μ_i/mH·m^{-1} (50 Hz)	μ_{max}/mH·m^{-1} (50 Hz)	铁芯损耗/W·kg^{-1}	
								60 Hz 1.4 T	20 Hz 0.2 T
$Co_{58}Ni_{10}Fe_5(Si, B)_{27}$	0.55	0.8～1.0	—	—	—	—	250	—	1 015
$Co_{58}Ni_{10}Fe_5(Si, B)_{27}$	—	0.2～0.4	—	—	—	125	375	—	—
$Co_{67}Ni_3Fe_4Mo_2B_{12}Si_{12}$	0.55	0.4	0.5	135	340	—	—	—	—
$Co_{70}Fe_5(Si, B)_{25}$	0.85	0.48	—	130	—	75	125	—	—
$Co_{66}Fe_4(Mo, Si, B)_{39}$	0.55	0.2～0.4	—	—	—	—	75	—	—

这类合金主要应用包括：节能型变压器磁芯、开关电源平滑电路扼流圈、磁放大器型开关电源可饱和扼流圈、磁屏蔽、EMI滤波器、电涌噪声抑制圈和新型磁传感器等。

3.2.2 钴基非晶态磁头材料

钴基非晶态磁头材料有Co－Fe－Si－B系、Co－Zr系和Co－T－B系（T代表过渡族金属），它们无磁各向异性，作磁头的噪音小，电阻率高，硬度大，耐磨性好，耐腐蚀性强，主要应用于数字录音磁头、录像磁头、数据记录磁头等。我国已能生产的合金和技术指标见表 5.7-15（企业标准）。

表 5.7-15 钴基非晶态磁头合金组成及技术指标

合金成分	T_c /℃	θ_r /℃	B_s /T	H_c /A·m^{-1}	B_r /B_s	HV	ρ /μΩ·cm	μ_s /mH·m^{-1} (1 kHz, 0.8 A/m)
$Co_{83.5}W_6Zr_{10.5}$	578	453	0.72	0.8	0.27	585	137	11.0
$Co_{79}Cr_{10.6}Zr_{10.4}$	540	433	0.67	0.8	0.31	564	125	17.5
$Co_{77}Cr_{11.7}Zr_{11.3}$	549	360	0.54	0.6	0.15	574	126	43.5
$Co_{80.4}V_{9.8}Zr_{9.8}$	520	—	0.77	0.6	0.20	—	127	15.75
$Co_{82}Mo_{9.8}Zr_{8.2}$	526	576	0.85	1.6	0.65	552	123	8.5
$Co_{78}Mo_9B_2Zr_{11}$	565	361	0.62	0.8	0.33	—	—	25.0
$Co_{80}Mo_{9.5}B_2Zr_{8.5}$	588	568	0.75	0.6	—	800	—	4.25
$Co_{80}Mo_{8.5}B_5Zr_{8.5}$	508	> 600	0.77	0.8	—	750	—	2.5
$Co_{80}Ni_{10}Si_2Zr_8$	500	> 700	1.00	1.6	—	700	—	—
$Co_{81.5}Mo_{9.5}Zr_{9.0}$	570	498	0.73	0.2	0.35	561	125	26.25
$Co_{84}Cr_7B_1Zr_8$	580	> 700	1.00	0.8	—	750	—	2.5
$Co_{71.5}Fe_{2.5}Mn_3Si_8B_{15}$	486	448	0.95	< 1.6	—	900	—	18.75
2075X(72CoFeMoSiB)	—	530	1	1.44	—		—	15
$Co_{70}Fe_{2.5}Mn_{2.5}Si_{12.5}B_{12.5}$	507	357	0.82	0.8	—	850	122	23.75
$Co_{66.3}Fe_{4.5}Ni_{1.5}Nb_{2.2}Si_{10}B_{15}$	540	320	0.71	0.8	—	1 050	130	25
$Co_{66}Fe_{4.5}Cr_{4.5}Si_{10}B_{15}$	540	220	0.64	0.56	—	950	126	27.5
$Co_{66}Fe_4V_2Si_3B_{20}$	540	315	0.65	1.2	—	965	120	37.5

3.3 钴基磁记录材料简介

磁性存储（磁记录）技术已取得了巨大的进步，大容量的存储技术在信息处理、传递和保存中占有非常重要的地位。个人计算机的信息处理和保存都从数兆字节上升到数吉字节的量级，在军事情报、新闻广播、气象信息、地球物理和银行保险等领域，信息存储的容量更是以数量级的速度增加，信息存储材料的发展也是日新月异。现在高密度磁光存储和光存储技术已相继问世，磁记录的密度也在逐年提高，继续发展。

从开始的纵向磁化记录的纵向记录介质，即γ－Fe_2O_3、CrO_2、Co包覆γ－Fe_2O_3磁粉，发展到金属合金磁粉（Fe－Co－Ni合金磁粉等）和金属薄膜。目前以化学沉积和物理沉积方法制备的薄膜磁记录介质，如CoCrPt系列薄膜，记录密度可望达到1～2 Gb/in^2。钴基合金的连续薄膜介质的不断发展，其磁性能和记录密度不断提高，如Co基合金薄膜的矫顽力H_c由CoNiCr合金的$H_c \approx 100$ kA/m提高到CoCrTa合金的$H_c \approx 140$ kA/m，CoCrPt合金的$H_c \approx 200$ kA/m（提高记录密度必需提高介质的矫顽力）。同时还在向多层膜结构的方向发展。例如65nmCoCrPt/5nmCoCrTa多层膜结构的矫顽力可达300 kA/m，记录密度向10 Gb/in^{2}发展。

垂直磁记录技术（磁化方向和记录介质的平面垂直）的发展，使记录密度的提高又有新的突破。用高频溅射或电子束蒸发的Co－Cr薄膜，以及在Co－Cr合金中添加Mo、Re、V、Ta等合金元素的垂直记录介质薄膜，其记录密度可望超过10 Gb/in^2。

总之磁记录技术正在不断的发展进步，相关的磁化记录材料也在不断改进，其中钴基合金占有重要的地位。

4 钴基弹性合金

4.1 钴基高弹性合金

钴基高弹性合金是综合性能最好的弹性合金，该类合金不仅具有很高的弹性模量和弹性极限，极低的弹性后效，其抗拉强度σ_b可达2 900 MPa以上，同时还具有高耐疲劳性能、高硬度、耐磨、无磁，在许多介质中有极高的耐磨耐腐蚀能力（可在热的王水中浸泡12 min无腐蚀），有相当的热稳定性，其工作温度可达400～500℃，且缺口敏感性低。所以钴基高弹性合金广泛应用于各种要求高的小载面的弹性元件，如钟表发条、张丝、轴尖、特殊轴承以及各种弹性敏感元件

和弹力元件。

钴基高弹性合金首先是美国于 1950 年研究成功，作为发条材料应用，随后许多国家都研制出成分大体相似的合金，我国于 1958 年开始先后研制成功三种钴基高弹性合金并列出国家标准，牌号分别为3J21、3J22、3J24。表 5.7-16 为中国及美、俄等国钴基高弹性合金的牌号与成分。

表 5.7-16　各国常用钴基高弹性合金的牌号与化学成分　%

中国牌号	相当国外牌号	C	Si	Mn	Co	Ni	Cr	Mo	W	Ti	Al	Fe	其他元素
Co40NiCrMo (3J21)	K40HXM (俄)	0.07~0.12	≤0.6	1.7~2.2	39~41	14~16	19~21	6.5~7.5	—	—	—	余	
Co40NiCrMoW (3J22)	K40HXMB (俄)	0.06~0.13	≤0.3	1.5~2.5	39~41	14~17	19~21	2.8~4.5	4~6.5	—	—	余	Ce 0.01~0.04
	40KHXMИ (R) (俄)	0.07~0.09	≤0.5	1.8~2.2	39~41	15~17	19~21	6.4~7.4	—	—	—	余	Re 6.8~7.2
	40KHXM10BTЮ (俄)	≤0.05	≤0.5	1.8~2.2	39~41	18~20	11~13	7~11	6~8	1.0~1.4	0.2~0.5	余	Re 1.0~1.4
	40KHXMBTЮФ (俄)	≤0.05	≤0.5	1.8~2.2	39~41	19~20	11~13	3~4	6~8	1.0~1.4	0.2~0.6	余	Re 1.0~1.4 V6~8
Co40TiAl (3J24)	40KHXMBTЮ K40TЮ (俄)	≤0.05	≤0.5	2.0	40	20	13	3.0	6.0	2.0	0.3	余	
	Elgiloy (美)	0.15	<0.5	2.0	40	15.5	20	7.0	—	—	—	余	Be0.04
	Nivaflex (德)	0.03	0.5	1.0	40~45	21	18	4.0	4.0	1.0	—	余	Be0.3
	Citizen (日)	0.10	0.5	1.5	41	16	21	6.5	—	—	—	余	
	Phynox (法)	0.15	—	2.0	38	17	20	7.0	—	—	—	余	
	Dynavar	0.20	0.5	1.6	42.5	13	20	2.0	2.8	—	—	余	Be0.04
	Diaflex	—	—	1.0	40	20	15	4.0	4.0	1.0	—	余	

钴基高弹性合金有一个重要特点，就是必需通过形变热处理以后，才能获得最佳的性能指标。一般经 1 100 ~ 1 180℃固溶处理后，合金具有良好的塑性，进行冷变形，然后在400 ~ 550℃时效处理。3J21合金的力学性能与形变热处理的冷变形量和时效温度的关系，如图 5.7-1。

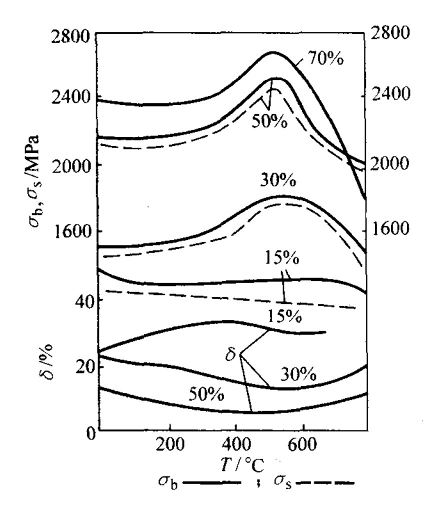


图 5.7-1　3J21 合金力学性能与形变热处理的冷变形量和时效温度的关系（实线 σ_b，虚线 σ_s，曲线上数字为冷变形量）

3J24 合金是添加了 Ti、Al，它产生合金化的 γ' 相，即 (Co、Fe、Ni)$_3$ (Ti、Al) 作为强化相。此合金也需进行形变热处理，1 150 ~ 1 180℃固溶处理后，冷变形，450 ~ 550℃时效。其力学性能与形变热处理的冷变形量和回火温度的关系如图 5.7-2。

钴基高弹性合金的主要力学性能和物理性能见表 5.7-17。

4.2　钴基高温高弹性合金

钴基高温高弹性合金是在钴基变形高温合金的基础上发展而成的，它的突出优点是耐磨、抗腐蚀性好，在高温使用时其优点更突出。对于这种合金美国研究较多，使用也较广泛。由于钴的价格昂贵，其他国家多用镍基合金取代。我国尚未将这种合金列入国家标准。国外常用钴基高温高弹性合金的牌号和化学成分如表 5.7-18。

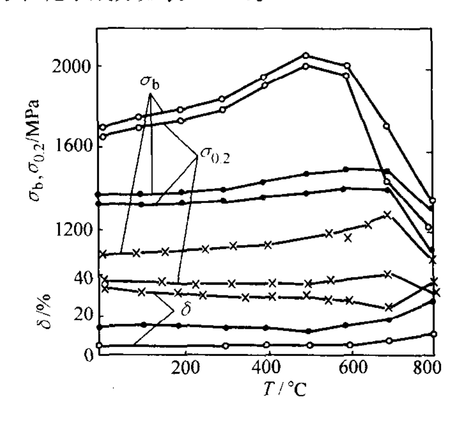


图 5.7-2　3J24 合金力学性能与形变热处理的冷变形量和时效温度的关系

（×冷变形 15%；●冷变形 30%；○冷变形 50%）

钴基高温高弹性合金在不同温度下的拉伸性能见表 5.7-19。

4.3　钴基恒弹性合金

一般情况下金属与合金的弹性模量 E（或 G）都是随温度的升高而降低。这种现象称为弹性模量——温度关系的正常变化。凡是弹性模量随温度的升高而变化不大、甚至随温度升高而增加的现象称为弹性模量——温度关系的反常变化。材料的弹性模量随温度的变化而保持基本不变化或变化很小的这种特性称为恒弹性，具有这种特性的合金称为恒弹性合金。恒弹性特征可以用弹性温度系数 β_E 表征。$\beta_E = \frac{\partial E}{\partial T}$。恒弹性合金的 β_E 值很小，甚至趋近于零。

表 5.7-17 国内外常用钴基高弹性合金的主要力学性能和物理性能

合金牌号	热处理状态	弹性模量 E/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.5}$(或 σ_e) /MPa	伸长率 δ /%	硬度 HV	电阻率 ρ /$\mu\Omega\cdot m$	使用温度范围/℃
Co40NiCrMo 3J21	1 100~1 180℃，固溶处理 固溶+冷变形+400~500℃、4 h 回火	— 204000	687~785 2 453~2 649	— 1 668	40~50 3~5	180~200 600~700	— 0.9~1.0	400
Co40NiCrMoW 3J22	1 150~1 180℃，固溶处理 固溶+冷变形+500~550℃、4h 回火	— 206 000	687~736 2 943~3 139	— 1 619~1 668	40~50 4~6	180~200 ≥750	— 0.9~1.0	400
K40HXMB	1 100~1 170℃，固溶处理 固溶+冷变形+450~550℃、3 h 回火	—	687~736 2 943~3 139	— 1 472~1 570	40~50 4~6	180~200 580~630	— 0.9~1.0	400
40 XHMИ (R)	1 170~1 180℃，固溶处理 固溶+冷变形+500~550℃、4 h 回火	— 211 000~216 000	883~981 3 139~3 728	— 1 815~1 913	40~50 —	180~200 700~800	— 0.9~1.1	
Co40TiAl 3J24	1 150~1 180℃，固溶处理 固溶+冷变形+500~550℃、4 h 回火	— 216 000	687~785 1 962~2 158	— 1 472~1 570	55~60 4~6	140~160 550~600	— 1.0~1.1	400
40KHXM10BTЮ	1 180~1 200℃，固溶处理 固溶+冷变形+500~550℃、4 h 回火	— 216 000~226 000	883~981 2 354~2 649	— 2 518~2 256	44~50 1~2	200~240 —	— 1.0~1.1	

表 5.7-18 国外常用钴基高温高弹性合金的牌号与化学成分

合金牌号	化学成分（质量分数）/%										
	C	Co	Ni	Cr	W	Mo	Nb	Fe	Mn	Si	其他
S-816	0.38	42.0	20.0	20.0	4.0	4.0	4.0	4.0	1.20	0.40	—
MAR-M918	0.05	52.0	20.0	20.0	—	—	—	—	—	—	Ta7.5
HS25（L-605）	0.10	52.9	10.0	20.0	15.0	—	—	—	1.50	0.50	—
Haynes188（HS188）	0.10	39.2	22.0	22.0	14.0	—	—	—	0.75	0.75	La0.08
CM-7	0.10	48.0	15.0	20.0	15.0	—	—	—	—	-	Ti 1.3 Al 0.5

表 5.7-19 钴基高温高弹性合金不同温度下的拉伸性能

合金牌号	热处理工艺	抗拉强度 σ_b/MPa					屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa					伸长率 δ/%				
		20℃	538℃	650℃	760℃	870℃	20℃	538℃	650℃	760℃	870℃	20℃	538℃	650℃	760℃	870℃
S-816	1 177℃、1 h，急冷，+760℃、12 h，空冷	966	842	766	648	359	386	312	304	283	242	30	27	25	21	16
HS-25（L-605）	1 230℃、1 h，空冷	1 007	800	711	456	324	462	248	242	262	242	64	59	35	12	30
MAR-M918	1 190℃、4 h，空冷	896	—	—	—	—	387					48				
HS-188	1 175℃、1 h，快速空冷	960	738	711	635	421	483	304	304	290	262	56	70	61	43	73
CM-7	1 200℃、1 h，空冷，+800℃、16 h，空冷	1 000	828	828	690	380	552	400	394	387	228	35	37	30	30	70

当弹性元件是在动态中应用，如频率元件（振子、音叉等），也常常要求频率温度系数这一性能指标 β_f。β_f 表示温度变化 1℃时，其共振频率 f_r 的相对变化值。即 $\beta_f=\frac{df_r}{f_r dT}$。

因为 β_f 与 β_E 有一定关系，通常材料的 β_E 值很小时，β_f 也很小。

材料的弹性模量与温度关系的反常变化现象又称为埃林瓦(Elinvar)效应。所以恒弹性合金也称埃林瓦合金。

Co-Fe系恒弹性合金（称为Co埃林瓦）是研究得最早，应用较广的恒弹性合金，特别在日本应用广泛。随后在 Co

- Fe 合金系的基础上加入第三、第四组元发展了Mo埃林瓦、W 埃林瓦、V 埃林瓦、Mn 埃林瓦等，以及在这些合金基础上研制出来的 Elcolloy 合金。这几个系列的合金中都有二个或三个不同成分的合金，其β_E和β_G都很小。其具体成分和主要性能如表 5.7-20。

表 5.7-20　Co - Fe 系埃林瓦合金的成分和退火态的性能

合金种类	成分（质量分数）/%								线胀系数（10～50℃）$/10^{-6}K^{-1}$	G（20℃）/MPa	B_G（20～25℃）$/10^{-5}K^{-1}$
	Co	Fe	Cr	Mo	W	V	Mn	Ni			
Co 埃林瓦系	60	30.0	10.0						5.1	69 000	-0.2
	43.6	34.6	12.7					9.1	7.4	69 400	0
	27.7	39.2	10.0					23.1	8.1	64 800	-0.3
Mo 埃林瓦系	50.0	32.5		17.5					9.6	73 500	-0.2
	10.0	45.0		15.0				30.0	9.8	78 500	-0.4
W 埃林瓦系	50.0	28.5			21.5				7.4	64 500	-0.7
	39.0	32.0			19.0			10.0	7.8	81 300	+0.4
V 埃林瓦系	60.0	30.0				10.0			8.1	65 200	0
	20.0	40.0				10.0		30.0	11.6	70 000	-0.7
Mn 埃林瓦系	55.0	37.5					7.5		9.8	79 400	-11.3
	35.0	35.0					10.5	20.0	11.5	54 500	-4.3
Elcolloy 系	35.0	36.0	5.0	4.0	4.0			16.0	9.0		+0.5
	40.0	35.0	5.0		5.0			15.0	5.0		-0.2

表 5.7-20 中Elcolloy合金的综合性能更为优越，其退火状态下的σ_b = 1 716.8 MPa，σ_s = 1 304.7 MPa，该合金在退火状态下可用作音叉材料。

Co - Fe系恒弹性合金发展的一个趋势是降低合金中的钴含量，并加入Nb、Ti、Al、B等沉淀强化元素，派生出新的Co - Fe系恒弹性合金。合金经形变热处理以后具有很高的强度，并显著减小非弹性性能。对于这类合金我国已有研制，但尚未列入国家标准。

4.4　钴基高导电弹性合金

钴基高导电弹性合金俄罗斯牌号为67KH5Б。合金的主要化学成分为：C≤0.05%、Ni 27% ~ 29%、Nb 4.8% ~ 5.2%、Ti 0.03%、B 0.003%，余为 Co。合金的电阻率为 0.28～0.34 μΩ·m。其导电性略高于锰铜合金。可以制作各种载流弹性元件、接触弹簧、各种类型继电器用带状弹簧和耐高温导电弹簧。

此合金经1 000～1 050℃固溶处理后的塑性很好，伸长率δ = 35% ~ 40%。合金经形变热处理以后可获得最佳综合性能。如固溶处理后，经35% ~ 40%冷变形，650℃时效1 h，其力学性能、比电阻、高温（400～450℃）下的松弛稳定性达到最佳配合。σ_b = 2 060 MPa，ρ = 0.28 μΩ·m，400℃ σ_0 = 343.4 MPa，100 h 的松弛稳定性为 5%。

5　钴基轴尖合金

在精密仪器仪表中，有一类仪表是由轴尖 - 宝石轴承结构作为仪表可动部分的支撑，二者之间的摩擦力矩决定了仪表的误差、变差和不回零值，它对仪表的精密等级、灵敏程度、使用寿命起着决定作用。其中轴尖是关键元件之一。所谓轴尖就是其几何形状和尺寸公差都有严格要求的一种小轴（要求在 60 倍显微镜下观察检验），其形状如图 5.7-3 所示。

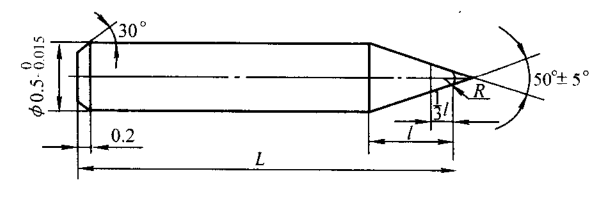


图 5.7-3　电工测量仪表轴尖

为了满足仪表应用时的可靠性，制作轴尖的合金材料要求同时具有高硬度、高强度、高弹性、耐磨损、抗冲击；根据使用环境和工况条件的不同，有的还要求耐腐蚀、无磁性，这是一类要求很高的特殊弹性合金。除了对合金的物理力学性能有严格要求之外，同时对合金的内部质量，例如夹杂物的等级都有严格规定，所以生产轴尖合金的生产工艺也有特殊要求。

轴尖合金主要是钴基弹性合金，上小节介绍的 3J21 合金，就可以作为轴尖材料。也有高铬镍基合金也可作为轴尖材料。我国从 20 世纪 70 年代就开始研制了几个牌号的轴尖合金，并制定了 ZBY186—1983、ZBY322—1985 等技术标准，目前我国生产的轴尖合金的牌号与成分见表 5.7-21。

轴尖合金都通过形变热处理而获得最高性能。合金在 1 100℃以上固溶处理后获得单相过饱和固溶体，即单相过饱和奥氏体 γ，γ 相具有良好的塑性，可进行变形 90%的冷加工，随冷加工变形量的增加，合金的弹性、强度、硬度显著提高；冷加工后再进行时效处理可获得最高性能。其热处理工艺及性能如表 5.7-22。

表 5.7-21　我国轴尖合金的牌号与成分

合金牌号	成分（质量分数）/%													
	Co	Ni	Fe	Cr	W	Mo	Ti	Ak	Mn	Si	La	C	S	P
Co40NiCrMo (3J21)	39~41	15~17	余量	19~21	—	6.5~7.5	—	—	1.8~2.0	≤0.5	0.1	0.08~0.13	<0.02	<0.02
Co40NiCrMoW (3YC2)	30~41	14~16	余量	19~21	5.0~6.0	3.0~4.0	—	—	1.8~2.2	≤0.3	0.1	0.08~0.13	≤0.008	≤0.008
Co45NiTi (3YC11)	40~45	余量	—	15~20	8.0~11.0	3.0~4.0	≤1.5	≤0.5	1.5~2.2	≤0.5	0.1	0.05~0.08	<0.02	<0.02
Cr40NiAl (3YC14)	—	余量	—	38~40	—	—	—	3.0~3.5	≤0.01	≤0.01	0.1	≤0.03	≤0.01	≤0.01
Co45CrW (3YC15)	余量	15~17	—	19~21	16~18	—	—	0.4~0.6	1.5~2.2	≤0.3	0.1	0.16~0.17	≤0.008	≤0.008

表 5.7-22　仪表轴尖用合金的性能与用途

合金牌号	热处理条件与状态	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.005}$/MPa	伸长率 δ/%	硬度 HV	密度 /g·cm^{-3}	弹性模量 E/MPa	电阻率 ρ/μΩ·m	磁导率 μ/H·m^{-1}	用途举例
Co40NiCrMo (3J21)	1 100~1 150℃淬火 淬火+>80%冷变形 +500℃时效	686~784 2 450~2 650	—	40~50	≥280 ≥746	8.4	206 000	0.9~1.0	(1.2~2.4) ×10^{-9}	仪表轴尖，耐蚀轴承，复位弹簧等
Co40NiCrMoW (3YC2)	1 100~1 160℃淬火 淬火+90%冷变形 90%冷变形+520℃时效	780~830 ≥2 160 ≥2 940	≥1 470	40~50 ≥2	≥280 ≥560 ≥750	8.5	186 000~196 000 ≥216 000	0.9~1.0	(0.8~1.6) ×10^{-9}	仪表轴尖、轴销、张丝、发条、高温弹簧等
Co45NiTi (3YC11)	1 150~1 180℃淬火 淬火+90%冷变形 90%冷变形+时效	≥880 ≥2 160 ≥2 940	≥1 820	40~50	≥280 ≥560 ≥800	8.8	≥196 000 ≥225 000	1.0~1.2	(1.6~2.4) ×10^{-9}	仪表轴尖，弹性敏感元件，密封元件等
Cr40NiAl (3YC14)	1 100~1 160℃淬火 淬火+90%冷变形 90%冷变形+时效	780~880 ≥1960	—	30~40	820~900	—	≥167 000 ≥216 000	— —	(5~6) ×10^{-11}	仪表轴尖，耐蚀轴承、刃具、传动零件等
Co45CrW (3YC15)	1 170~1 200℃淬火 淬火+80%冷变形 80%冷变形+时效	≥980 ≥2 350 ≥3 140	≥1 810	40~50 ≥2	≥280 ≥600 820~900	9.0	≥225 000	—	(0.8~1.6) ×10^{-9}	仪表轴尖，耐蚀轴承，高温弹簧等

6　钴基耐蚀合金

钴具有良好的耐蚀性，钴基合金也是优良的耐蚀材料，但由于钴资源稀缺，价格昂贵，所以只有在某些特定的条件下，才使用钴基耐蚀合金，例如某些仪表零件要求耐腐蚀的同时，还要求高强度、高硬度、耐冲刷和气体腐蚀时，可选用钴基耐蚀合金。

钴基耐蚀合金一般都含有大量 Cr、Ni、W、Mo 等元素，使合金产生显著的固溶强化，同时其加工硬化率很高，合金经冷变形后，抗拉强度可达 1 600 MPa 以上；有的合金碳含量较高，也有碳化物强化。本章第 2 节介绍的钴基高温合金 GH605、GH5188 以及 K640，都具有良好的耐蚀性能，也是优良的耐蚀材料。目前国外已有的钴基耐蚀合金的牌号与成分见表 5.7-23。

关于钴基耐蚀合金的物理性能和力学性能可参考本章第 2 节。

钴基耐蚀合金都具有优良的耐腐蚀、耐磨损、耐气蚀性能，同时具有在高温下抗氧化和硫化作用，在某些强酸及氧化性介质中的腐蚀速率都比较低。表 5.7-24 是钴基耐蚀合金在不同介质中的局部腐蚀的数据实例。

表 5.7-23　钴基耐蚀合金的牌号与成分

牌　号	成分（质量分数）/%										对应牌号
	Cr	Ni	W	Mo	Fe	Co	Mn	Si	C	其他	
Co70Cr21Ni	21	3	—	5	1.0	余	0.6	0.6	0.25	—	Haynes21
Co50Cr20Ni10W15	19～21	9～11	14～16	—	3.0	余	1.0～2.0	1.0	0.05～0.15	—	Haynes25（GH605）
Co60Cr25Ni10W8	25	10	8	—	1.0	余	0.6	0.6	0.4	—	Haynes31（K604）
Co40Cr22Ni22W15	20～24	20～24	13～16	—	3.0	余	1.25	0.2～0.5	0.05～0.15	0.06～0.15La	Haynes188（GH5188）
Co60Cr30NiW	28～32	3	3.5～5.5	1.5	3.0	余	2.0	2.0	0.9～1.4	—	Stellite 6B
Co40Cr20Ni15Mo	20	15	—	7	余	40	—	—	0.15	—	Elgiloy
Co35Cr20Ni35Mo	20	35	—	10	—	35	—	—	—	0.8Ti	MP35N
Co35Cr20Ni25MoFe	19	25	—	7	9	36	—	—	—	3.0Ti，0.2Al，0.6Nb	MP159N

表 5.7-24　钴基耐蚀合金在某些介质中的局部腐蚀数据

牌号及状态	试验介质	试验温度/℃	腐蚀速率/mm·a^{-1}	点蚀或缝隙腐蚀
Co40Cr20Ni15Mo	$FeCl_3$ 10%·$6H_2O$、0.1NHCl	25 70	≤0.025 0.178	无 有
Co50Cr20Ni10W15	H_2SO_4 7%①、HCl 3%①、$FeCl_3$ 1%、$CuCl_2$ 1%	25	0.01	无
Co50Cr20Ni10W15 固溶体	H_2SO_4 7%①、HCl 3%①、$FeCl_3$ 1%、$CuCl_2$ 1%	102	0.038	无
Co40Cr22Ni22W15 固溶体	H_2SO_4 7%①、HCl 3%①、$FeCl_3$ 1%、$CuCl_2$ 1%	25 102	<0.025 0.221	无 有
Co40Cr22Ni22W15 48%冷变形，760℃时效	$FeCl_3$ 10%·$6H_2O$	70	<0.025	无
Co40Cr22Ni22W15 48%冷变形，816℃时效	$FeCl_3$ 10%·$6H_2O$	70	0.188	有
Co60Cr30NiW 1.2%C	$FeCl_3$ 10%·$6H_2O$	室温	0.33	有
Co60Cr30NiW 0.4%C	$FeCl_3$ 10%·$6H_2O$	室温	<0.025	无
Co35Cr20Ni35Mo 固溶体	$FeCl_3$ 10%·$6H_2O$	70	<0.025	无
Co35Cr20Ni35Mo 固溶体	H_2SO_4 7%①、HCl 3%①、$FeCl_3$ 1%、$CuCl_2$ 1%	70 102	<0.025 0.452	无 有
Co35Cr20Ni35Mo 560～780℃时效	$FeCl_3$ 10%·$6H_2O$、0.1NHCl	30	<0.025	无
00Cr15Ni60Mo16W4 固溶体	H_2SO_4 7%①、HCl 3%①、$FeCl_3$ 1%、$CuCl_2$ 1%	70 102	0.076 0.61	无 无
00Cr15Ni60Mo16W4 37～59%冷变形	$FeCl_3$ 10%·$6H_2O$	70	<0.025	无
00Cr15Ni60Mo16W4 26%冷变形 500℃时效	$FeCl_3$ 10%·$6H_2O$	70	<0.025	无

① 体积分数。

编写：唐仁政（中南大学）
审稿：田荣璋（中南大学）

参考文献

1 美国金属学会．金属手册．第9版：第3卷．北京：机械工业出版社，1991

2 化学工业部化工机械研究院．腐蚀与防护手册．北京：化学工业出版社，1990

3 功能材料及其应用手册编写组．功能材料及其应用手册．北京：机械工业出版社，1991

4 朱中平等．机电材料新资料手册．北京：中国物资出版社，2002

5 R.W. 卡恩，P. 哈森．E.J. 克雷然．材料科学与技术丛书：第8卷，非铁合金的结构与性能．北京：科学出版社，1999

6 中国航空材料手册编辑委员会．中国航空材料手册：第2卷，变形高温合金、铸造高温合金．北京：中国标准出版社，2002

7 中国航空材料手册编辑委员会．中国航空材料手册：第5卷，粉末冶金材料、精密合金与功能材料．北京：中国标准出版社，2002

8 师昌绪，李恒德，周廉主编．材料科学与工程手册：上卷．北京：化学工业出版社，2004

9 干福熹．信息材料．天津：天津大学出版社．2000

10 张万鲲．电子信息材料手册．北京：化学工业出版社，2001

11 安继儒．中外常用金属材料手册．西安：陕西科学出版社，1998

12 黄建中，左禹．材料的耐蚀性和腐蚀数据．北京：化学工业出版社，2003

13 中国工业材料大典编委员．中国工业材料大典：中卷，有色金属．上海：上海科学技术文献出版社，1999

14 方昆凡主编．工程材料手册：有色金属材料卷．北京：北京出版社，2002

第6篇

锌、铅、锡及其合金

主 编 田荣璋
主 审 唐仁政
编 写 田荣璋 王 平
审 稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会

第1章 锌及其合金

1 概述

1.1 锌的资源及冶炼

1.1.1 锌的资源

锌在地壳中的丰度为 82 g/t，资源总储量为 325 Mt，探明储量为 162 Mt。自然界已发现 80 多种含锌矿物，有工业生产价值的矿物如闪锌矿（ZnS）、菱锌矿（$ZnCO_3$）、红锌矿（ZnO）等，目前主要使用的是闪锌矿。

锌的探明储量，在 10 种常用有色金属中，仅次于铝和铜。

世界部分国家锌储量和储量基础见表 6.1-1。

表 6.1-1 1998 年世界部分国家锌储量和储量基础

国　　家	储量/万吨	储量基础/万吨
澳大利亚	3 600	9 000
中国	3 300	8 000
美国	2 500	8 000
加拿大	1 400	3 900
秘鲁	700	1 200
墨西哥	600	800
其他国家	7 200	13 000
世界总计	19 000	44 000

我国锌矿资源分布广泛，遍布全国 29 个省、市、自治区。1998 年全国已利用锌矿区 307 处。截至 1998 年底，我国锌矿保有储量 9 244.87 万吨。

1.1.2 锌的冶炼

很久以前人们就知道锌的存在，直到公元 14 世纪才开始商业性生产。锌作为合金元素，比冶炼纯锌早，考古学家在山东胶县"龙山文化"地层中发现的黄铜锥，含锌量高达 23.2%，是公元前 2400～2000 年的产物，它是世界上最古的黄铜器，证明我国是应用锌最早的国家。

在我国，最古老的炼锌工艺是将要焙烧的矿石与无烟煤混合后松散地置于黏土罐中，罐子上方安放一黏土坩埚作为冷却室，在坩埚内有一黏土杯作为冷凝锌的收集器，黏土坩埚的上端盖以铁盘（见图 6.1-1）。将许多个这样的罐子排于炉子内，在罐子周围用燃料加热，当温度达 1 000℃时矿石中的氧化锌开始还原，锌蒸气和一氧化碳进入上方的冷却室，在冷却室中大部分锌蒸气冷却后凝结在黏土杯中，将之收集起来即得到金属锌。

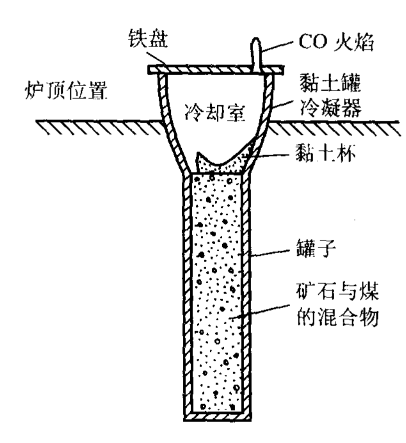


图 6.1-1 我国早期炼锌使用的黏土罐及其冷凝系统示意图

中国是最早掌握炼锌技术的国家，明代著作《天工开物》记述过炼锌技术，称锌为倭铅。在欧洲，17 世纪和 18 世纪使用的锌大多都是从我国和印度购进的。大约在 1730 年冶炼锌技术才由我国传到英国，后来又相继传入欧洲其他一些国家。

在炼锌方法上，自古以来一直走着火法高温还原的道路。竖罐蒸馏炼锌的工艺流程如图 6.1-2。

湿法炼锌的兴起，改变了延续久远的炼锌状况，这就是电解炼锌。大约在第一次世界大战中期，湿法电解炼锌才正式投入工业生产，不到半个世纪，产量就超过了火法炼锌。从此以后两种炼锌方法并行，都在不断地改进。湿法炼锌工艺流程见图 6.1-3。

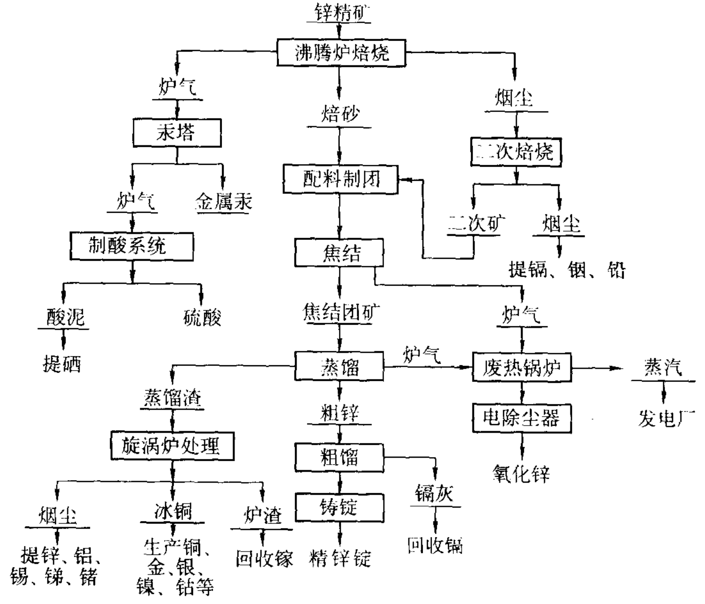


图 6.1-2 竖罐蒸馏炼锌工艺流程图

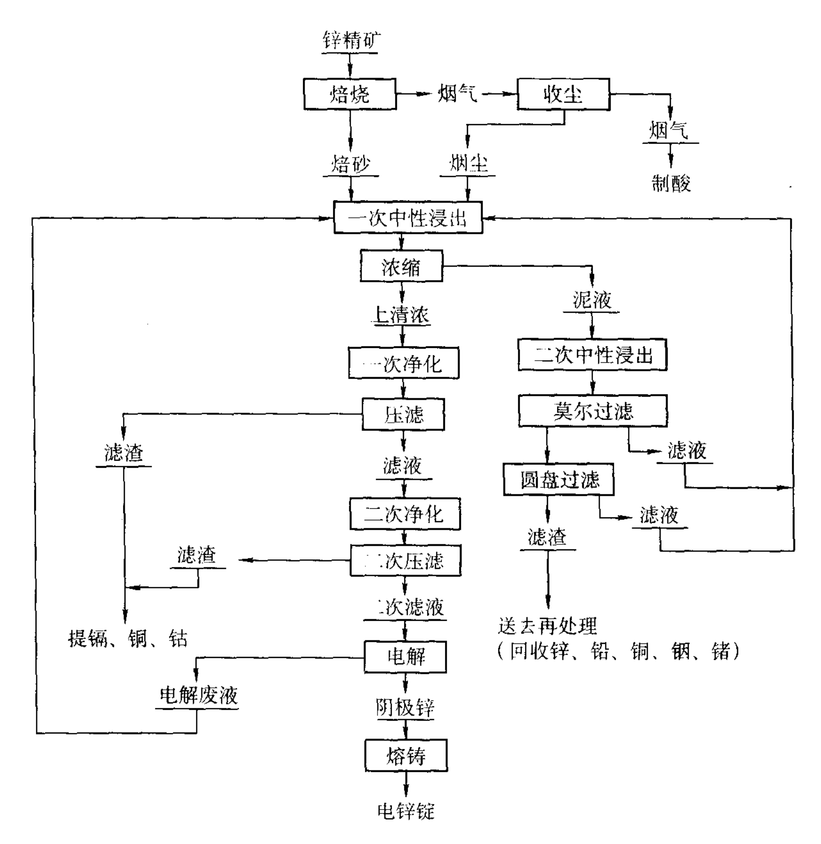


图6.1-3 湿法电解炼锌工艺流程图

1.2 锌的生产量与消费量

我国锌资源不但储量多，居世界前列，品位也高，年产量已接近230万吨，居世界之冠。全球主要产锌国家的锌产量见表6.1-2。

表6.1-2 主要产锌国家的锌产量 万吨

国家	2000年	2001年	2002年	2003年
中国	195.7	203.8	216	228
加拿大	77.7	67.3	77.9	81.9
日本	65.3	64.5	63.0	64.0
韩国	47.4	50.8	59	59.5
澳大利亚	50.2	55.1	55	55
西班牙	38.9	43.5	51.3	51.3
德国	33.2	33.5	33.3	34
英国	37.2	33.6	32.0	34
墨西哥	23.6	30.4	30.7	33
哈萨克斯坦	26.6	28	28.3	31
上述国家综合	595.8	610.5	646.5	671.7
世界合计	899.3	920	971.2	984.9

世界锌的消费情况见表6.1-3。

表6.1-3 世界锌的消费情况 万吨

国家	2000年	2001年	2002年	2003年
中国	135	149	175	190
美国	134	119	121	126
日本	68	64	62	62
德国	58	55	57	58
韩国	43	39	43	45
意大利	38	35	37	37
法国	31	30	28	29
比利时	29	30	29	29
印度	27	28	29	30
上述国家合计	563	549	582	605
世界合计	899.3	891.9	936.9	959.9

2003年中国锌的进出口情况见表6.1-4。

表6.1-4 中国锌的进出口情况 万吨

品种	出口量		进口量	
	全年（估）	与上年同比/%	全年（估）	与上年同比/%
精锌	46.3	-14.6	6.5	242
锌合金	2.3	14.4	14.2	15.4
锌材	1.5	15.4	5.6	19.1
废杂锌	0.3	50	5.0	42.9

国内锌市场供求情况见表6.1-5。

表6.1-5 中国锌市场供求情况 万吨

项目	2000年	2001年	2002年	2003年
产量	195	204	216	228
进口量	14	15	22	30
出口量	70	61	56	53.4
表观消费量	139	158	182	204.6
消费量	135	149	175	190
市场平衡	4	9	7	14.6

从表6.1-2～表6.1-5中看出，中国是产锌大国，而且产量年年增加；中国也是消费锌的大国，其消费量年年攀升；中国还是锌的出口大国。

1.3 锌的应用

与其他非铁金属一样，锌的需求量在不断地增加。目前，欧洲人均用锌量为6.5 kg，而亚洲仅0.9 kg。但是，由

于亚洲经济的发展，基本建设的增加，建筑业和汽车工业的兴起，用锌量快速增长。我国锌消费增长最快的是铜加工业和镀锌业以及干电池（出口量猛增）用锌。

据统计，国际上和我国锌产品应用领域及其所占份额见表 6.1-6。

表 6.1-6 中的数据显然是不会十分准确的，而且随着经济的发展和科技的进步，以及各国国情的不同在不断地变化，总之还是可以作为参考的。

表 6.1-6　国际工业发达国家和中国用锌领域

用锌领域	占用锌领域的百分数/%	
	国际	中国
镀锌	50	35
锌基合金	13	9
合金元素	18	25
加工产品	6	12
化工产品	8	14
其他	5	7

2　锌及其合金的物理冶金基础

2.1　纯锌

2.1.1　物理性质

锌的物理性质见表 6.1-7。

表 6.1-7　锌的物理性质

项　目	数　值
原子序数	30
相对原子质量	65.38
晶体结构	密排六方
点阵参数	$a = 0.266\ 49$ nm，$c = 0.494\ 69$ nm，$c/a = 1.856$
熔点/℃	419.5
沸点/℃	907
密度（25℃时）$/g\cdot cm^{-3}$	7.14
热导率 18℃时$/W\cdot(m\cdot K)^{-1}$	113
线胀系数（多晶体，20～250℃）$/10^{-6}K^{-1}$	39.7
电阻率（多晶体，0～100℃）$/\mu\Omega\cdot cm^{-3}$	5.96
电阻温度系数$/K^{-1}$	0.004 17
弹性模量/GPa	8～13
切变模量/GPa	8

2.1.2　力学性能

锌的力学性能见表 6.1-8。

表 6.1-8　锌的力学性能

项　目	数值	项　目	数值
屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa		面收缩率 ψ/%	
铸造状态	75	铸造状态	30
加工状态	80～100	加工状态	60～80
抗拉强度 σ_b/MPa		冲击韧度 $a_k/J\cdot cm^{-2}$	6～7.5
铸造状态	120～140	布氏硬度 HBS	
加工状态	120～170	铸造状态	30～40
退火状态	70～100	加工状态	35～45
伸长率 δ/%			
铸造状态	0.3～0.5		
加工状态	40～50		
退火状态	10～20		

2.1.3　锌的化学性质

锌在干空气和农村大气环境中有较好的耐蚀性能，其腐蚀速度为 0.001～0.000 1 mm/a，而在工业区大气中，因为水蒸气常呈酸性，使锌的腐蚀速度增加，约为 0.005 mm/a。此外，工业区空气，干、湿交替变化，也会加剧锌的腐蚀。在空气不流通的潮湿地方，含有氧和二氧化碳等气体的水蒸气，在锌表面上凝结水滴后，徐徐放出氧气，使水滴内部的含氧量低于水滴外层的含氧量，结果形成微电池，使水滴内部的锌表面产生腐蚀斑点（$2ZnCO_3\cdot Zn(OH)_2$），通称"白锈"。因此，锌材在潮湿地区生产、贮存和运输，均应注意通风。密封包装时，应事先消除水汽。

锌在淡水中相当稳定，在软水中的腐蚀速度比在硬水中的大。随着水中氧、二氧化碳、硫化氢、二氧化硫等气体含量的增加，锌的腐蚀速度也增大。另外，锌在水中的腐蚀速度随温度的增高而加快，65～75℃时显极大值。超过这一温度，水中气体含量减少，腐蚀速度又降低。

锌在海水中的腐蚀速度为 0.025～0.05 mm/a。重铬酸钠、硅酸钠、六偏磷酸钠、硼砂等可作为锌在水中的缓蚀剂。

溶液的 pH 值对锌的腐蚀有重要的影响。锌在中性溶液中比较稳定，而在无机酸和碱的水溶液中易于腐蚀。锌的腐蚀速度与水溶液 pH 值的关系见图 6.1-4。由图可知，pH 值在 6～12 范围内，锌有良好的耐蚀性。

锌在各种盐溶液中的腐蚀速度见表 6.1-9。

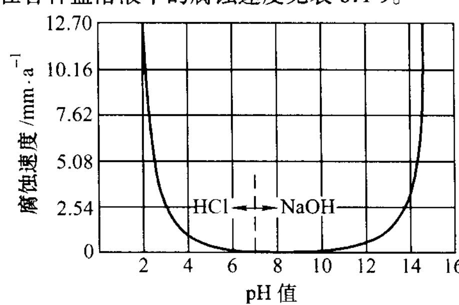


图 6.1-4　水溶液中锌的腐蚀速度和 pH 值的关系

表 6.1-9　室温时锌在盐溶液中的腐蚀速度

腐蚀介质	腐蚀速度 $/g\cdot(m^2\cdot d)^{-1}$	腐蚀介质	腐蚀速度 $/g\cdot(m^2\cdot d)^{-1}$
3%氯化钠	14	1%硫酸钠	1.57
3%氯化钠 + 1%硫酸钠	22.4	1%氯化镁	0.23
3%氯化钠 + 1%氯化镁	0.28	人造海水	0.36

锌的标准电极电位为 −0.76 V，它与其他金属间的电位差见表 6.1-10。从表 6.1-10 中可以看出，锌对碳以及许多其他金属均呈阳极，因此锌在大气、水和各种腐蚀介质中，与其他金属接触时，锌自己首先受到腐蚀而保护了电位较高的金属。锌的这种电化学保护作用在工业上得到了广泛的应用，如钢铁材料和零件的各种镀锌防止腐蚀。

表 6.1-10　锌与其他金属间电位差值　　V

名称	碳	铜	铁	铅	铂	锡	黄铜
锌	−1.096	−0.750	−0.600	−0.210	−0.281	−0.281	−0.670

锌的再结晶温度较低，压力加工对锌的耐蚀性影响不大。

已经知道，各种纯度的锌在大气中的耐蚀性能相接近。但在其他介质中，杂质和合金元素对锌的腐蚀有显著影响，如锌中铅、锡、镉等的含量增加，其在热水及其蒸气中的腐

蚀速度明显加快。一些元素对锌的腐蚀速度的影响见图6.1-5和表6.1-11。

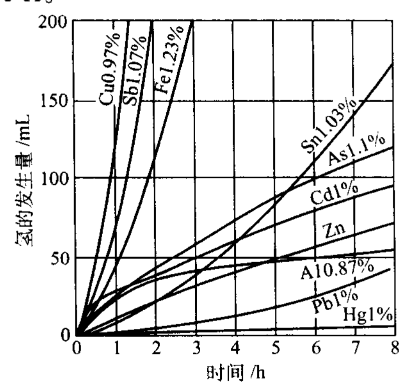


图6.1-5 含有各种杂质的锌在0.5当量硫酸溶液中的腐蚀速度

表6.1-11 各种杂质对锌腐蚀的影响

杂质名称	锌在不同杂质含量（%）下的腐蚀速度/g·(m²·d)⁻¹						
	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0
铅	0.72	1.14	1.12	0.86	0.86	1.16	1.21
锡	0.76	0.81	0.97	0.93	0.98	0.94	0.96
锑	0.76	1.13	1.08	1.03	0.92	0.87	0.88
铁	0.76	0.94	0.92	0.86	0.93	—	—
镉	0.72	0.96	0.91	—	—	—	—

注：1. 表中数值是平均值；
2. 试样条件：在20℃试验16周；
3. 试验溶液：1%氯化钠水溶液。

2.2 合金元素的作用

形成锌合金的主要添加元素有铝、铜和镁，少数锌合金中还加钛、锰、锆或稀土金属等。

锌和铝形成的相图如图6.1-6。

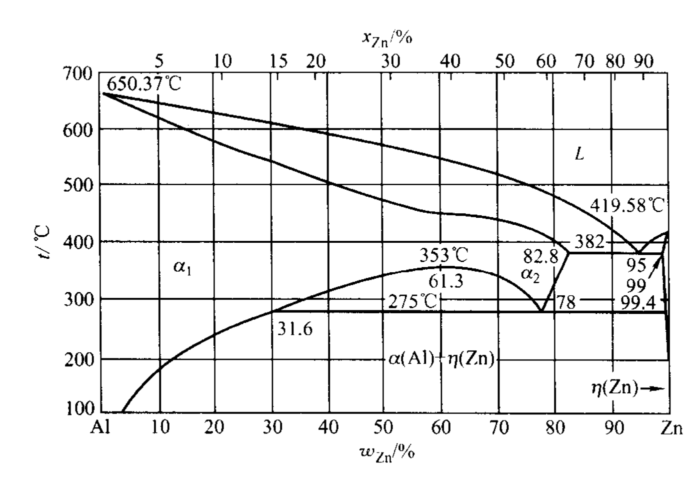


图6.1-6 Zn-Al二元相图

还有一种Zn-Al相图，有高温γ（ZnAl）相区，γ进行共析分解。此处未作介绍。

铝在锌中的溶解度随温度变化，锌在铝中的溶解度随温度变化的更大，见表6.1-12。

Zn-Al二元合金中，有一个共晶反应和一个偏析反应。

共晶反应为：$L_{(95\%Zn)} \xrightarrow{382℃} \alpha_{(82.8\%Zn)} + \eta_{(1\%Al)}$

偏析反应为：$\alpha_{2(78\%Zn)} \xrightarrow{275℃} \alpha_{1(31.6\%Zn)} + \eta_{(0.6\%Al)}$

表6.1-12 Zn-Al二元相图中两元素的溶解度与温度的关系

温度/℃	Zn在Al中的溶解度		温度/℃	Al在Zn中的溶解度	
	w_{Zn}/%	x_{Zn}/%		w_{Al}/%	x_{Al}/%
77	2.5	1.25	—	—	—
127	6.2	2.85	—	—	—
177	11.5	5.50	—	—	—
227	18.0	8.00	227	0.42	0.21
275	31.6①	15.90	275	0.60	0.30
327	43.5	24.00	—	—	—
353	61.3	38.7	—	—	—
382	82.8	65.0	382	1.0	0.55

① 275℃正处在偏析反应温度，Zn在Al中有两个溶解度，除31.6%以外，偏析点处为78%。

锌中加入0.02%Al，可减少锌的氧化，提高铸锭的表面品质。加入0.1%Al可抑制$FeZn_7$脆性化合物的形成。减少铸锭脆性，同时，减轻锌对铁型模壁的浸蚀。微量铝还可细化晶粒。铝能提高锌的抗拉强度和冲击韧度，见图6.1-7。在含铝量为4%～5%时，Zn-Al合金的综合性能（包括抗拉强度、冲击韧度和流动性）最好。显然，在这一成分范围是构成铸造锌合金的基础。大多数Zn-Al合金，在高温下的组织多为（α+η）共晶体，在低于275℃时，$\alpha_{(78\%Zn)}$相发生偏析转变，而$\alpha_{(78\%Zn)}$固溶体相发生分解时合金有体积变化。

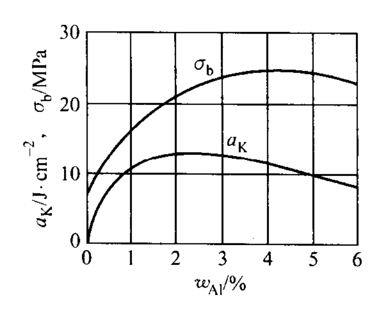


图6.1-7 压铸锌-铝合金的抗拉强度、冲击韧性与铝含量的关系

Zn-Al合金的冲击韧度，随含铝量的增加也是曲线变化，在含3%Al以下，随含铝量的增加冲击强度在增加，见图6.1-8。

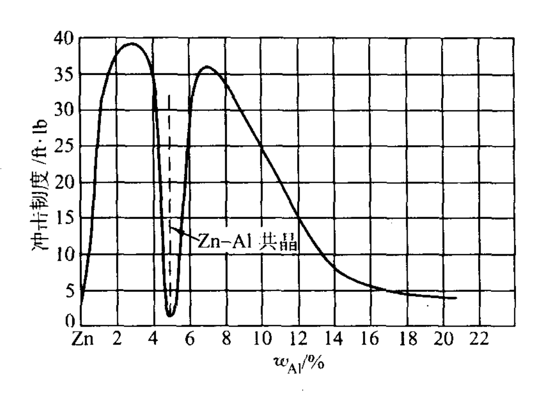


图 6.1-8　Zn－Al 合金的冲击韧度与铝含量的关系

1ft·lb = 1.355 82 J

含铝量及热处理对 Zn－Al 合金力学性能的影响见图 6.1-9。合金中含铝量增加抗拉强度提高，密度减小，表现出比强度的优越性。含 25%左右铝的 Zn－Al 合金抗拉强度最高，成为开发 27%Al 的 Zn－Al 合金的基础。含 22%Al 的共析合金冲击韧度和伸长率较好，有良好的超塑性。砂型铸造，含铝量为 10%～15%合金的强度较高，而伸长率和冲击韧度随含铝量的变化不大。

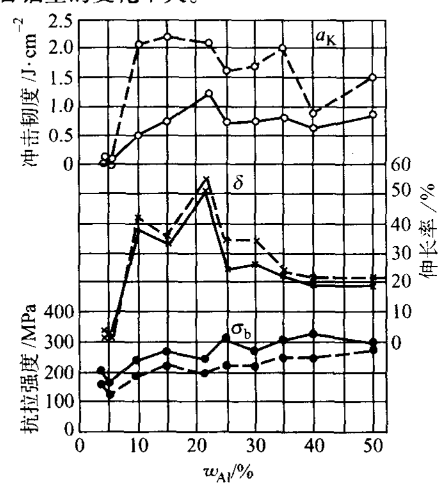


图 6.1-9　铝含量及热处理对 Zn－Al 合金力学性能的影响

（——铸态；－－－稳定化态）

在共晶成分附近的锌合金有严重的晶间腐蚀倾向，该合金推广应用受到很大阻力。

锌中加铜是包晶反应，除形成以锌为基础的含 Cu 固溶体 η（Cu）外，还形成 ε 相，能提高锌的硬度、抗拉强度和冲击韧度，但降低流动性和塑性。少量铜加速偏析转变，促使体积变化。含铜量较多的合金，从高温缓慢冷却或在某一温度下长时间保温，将有 ε 相析出（见图 6.1-10），同时明显地引起体积收缩，如 1%、2%和 3%Cu 的 Zn－Cu 合金，在金属型铸造后，再于 95℃时效 324 h，分别缩短 0.004%、0.009%和 0.02%。

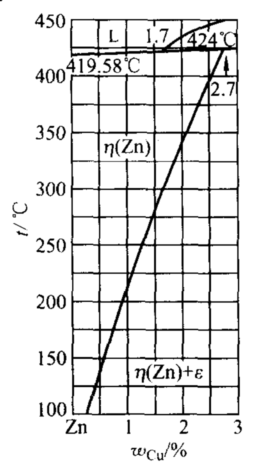


图 6.1-10　Zn－Cu 相图

锌中同时加铝和铜，液相面投影图见图 6.1-11，Zn－Al－Cu 三元系反应系统见表 6.1-13，恒温反应成分和温度见表 6.1-14。

铝和铜对锌的抗拉强度的影响见图 6.1-12。在 Zn－Al－Cu 合金中，含铜量超过 1%时，时效后的冲击韧度有所降低。

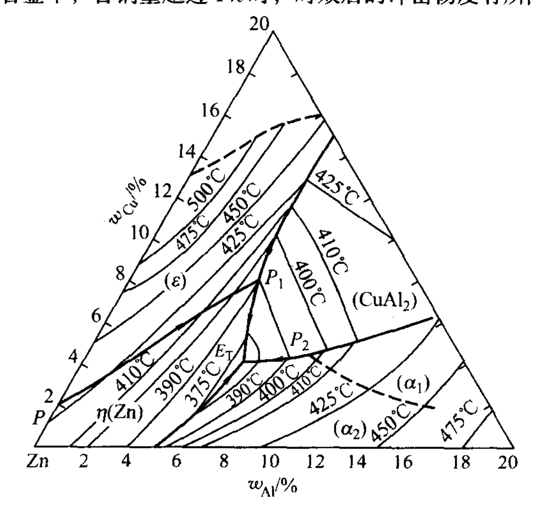


图 6.1-11　Zn－Al－Cu 系液相面

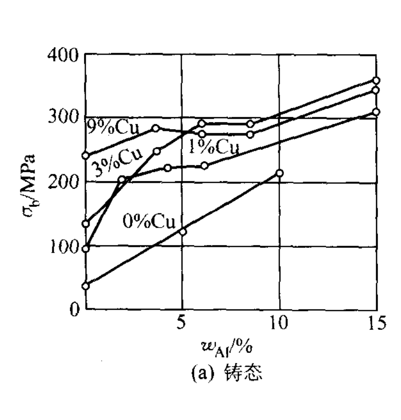
表 6.1-13　Zn－Al－Cu 系反应系统图

Zn-Cu 系	Zn-Al-Cu 系	Al-Cu 系
L+ε ⇌ η(Zn) ……(P)	L ⇌ CuAl₂+ε	
	L+ε ⇌ η(Zn)+CuAl₂ ……（P_1）	
	L+α₁ ⇌ α₂①	L ⇌ α+CuAl₂ ……（E_1）
Zn-Al 系	L+α₁ ⇌ α₂+CuAl₂ ……P_2	
L ⇌ α+η（Zn）……（E_2）	L ⇌ η(Zn)+CuAl₂　L ⇌ α₂+CuAl₂	
	L ⇌ η（Zn）+α₂+CuAl₂ ……（E_T）	
α₂ ⇌ α₁+η(Zn) ……（H）	α₂ ⇌ η(Zn)+CuAl₂　α₂ ⇌ α₁+CuAl₂	
	α₂ ⇌ η(Zn)+α₁+CuAl₂ ……（H_T）	

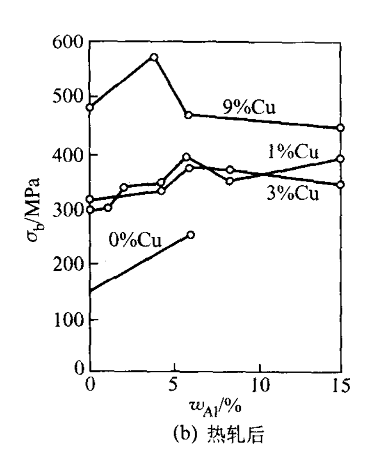
① Zn－Al 二元系添加少量 Cu 的（L，α₁，α₂）3 相共存包晶反应。

表 6.1-14　恒温反应成分和温度

种　类	Al/%	Cu/%	Zn/%	温度/℃	种　类	Al/%	Cu/%	Zn/%	温度/℃
包晶点（p）	—	1.8	余	424	包共晶点（P_1）	5.5	8.5	余	390
二元共晶点（E_1）	—	33.0	余	548	包共晶点（P_2）	10.5	5.5	余	392
二元共晶点（E_2）	5	—	余	382	三元共晶点（E_T）	7.0	4.0	余	372
共析点（H）	78	—	余	283	三元共析点（H_T）	~14.5	~3.5	余	276



(a) 铸态



(b) 热轧后

图 6.1-12　铜和铝对锌的抗拉强度的影响

镁与锌形成硬而脆的化合物，微量的镁就能对锌的力学性能产生重大的影响，当含镁量≥0.005%时，显著提高锌板冷轧后的抗拉强度，如含 0.01%Mg 的锌，加工率为 40%的冷轧板，抗拉强度可达 260 MPa，不含镁时，仅为 17 MPa。

加少量镁可延缓偏析转变，阻滞合金体积变化，提高 Zn-Al 合金的尺寸稳定性，能抵消少量铅在 Zn-Al 合金的有害影响，减轻晶间腐蚀倾向和产生膨胀的现象。在含铅的 Zn-4Al 合金中加入少量镁，能保持合金有较好的冲击韧度（见图 6.1-13），但降低流动性（见图 6.1-14）。在 Zn-Al-Cu 合金中加 0.04%Mg，对铸态和压铸态的零件进行时效时，其长度变化见图 6.1-15 和图 6.1-16。因此，在 Zn-Al-Cu 系合金中，大都加入少量如 0.02%~0.05%的镁，过多会降低合金的高温塑性。

镍的作用与镁相类似提高锌合金的尺寸稳定性，提高锌的耐蚀性。但超过 0.2%，会出现脆性化合物。

钛在锌中溶解度很小，300℃时仅有 0.007%~0.015%。锌中加入 0.08%~0.12%的钛，能细化晶粒，提高合金的力学性能和再结晶温度。

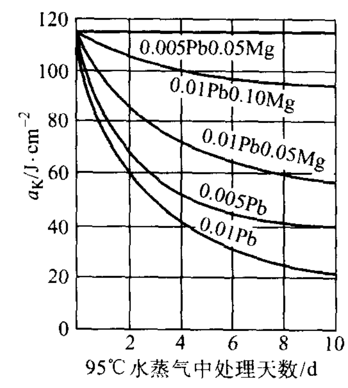


图 6.1-13　Zn-4%Al 合金在 95℃水蒸气中处理后其冲击韧度下降情况

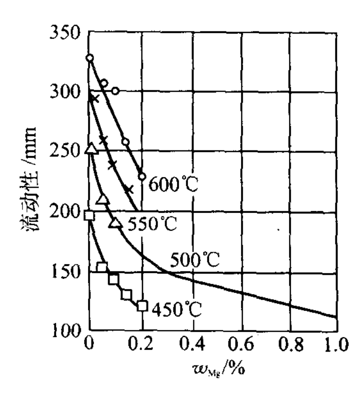


图 6.1-14　Zn-4%Al 合金中镁含量对流动性的影响

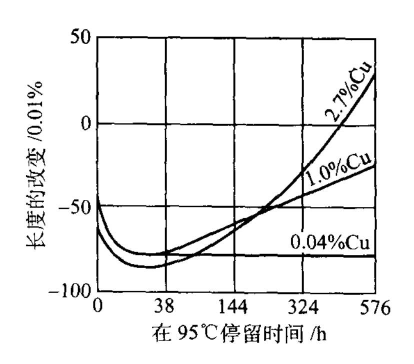


图 6.1-15　含 4%Al 和 0.04%Mg 的铸态锌合金在 95℃中的长度变化与含铜量间的关系

2.3　杂质的影响

锌合金中的杂质（如 Pb，Sn，Cd，Bi 等元素）过量会严重影响锌合金的耐蚀性能。锌合金中著名的“老化”问题，是在特殊环境（湿热气氛）中，由晶间腐蚀引起的尺寸及性能不稳定的现象。

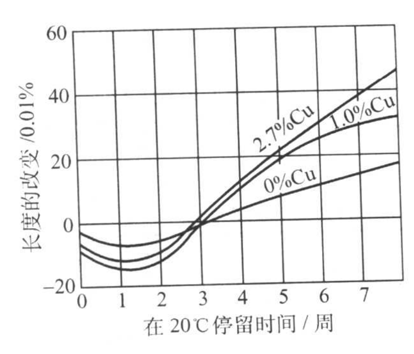


图 6.1-16 含 4%Al 和 0.04%Mg 的压铸状态锌合金在 20℃中的长度变化与含铜量间的关系

Pb，Sn 及 Cd 是锌中最常出现而又公认的有害杂质元素。在不含铝的 Zn-Pb，Zn-Sn 合金中没有晶间腐蚀倾向，但当在 Zn-Al 合金中存在 Pb，Sn 时，则显著加速腐蚀。多数人认为 Sn 比 Pb 危害性大，所以对 Sn 的限制要比 Pb 严格些。Cd 虽然也是有害杂质，有害性比 Sn 和 Pb 小。Pb，Sn，Cd 对 Zn-Al 合金的影响见图 6.1-17。杂质对共析合金的危害比对共晶合金的要大。

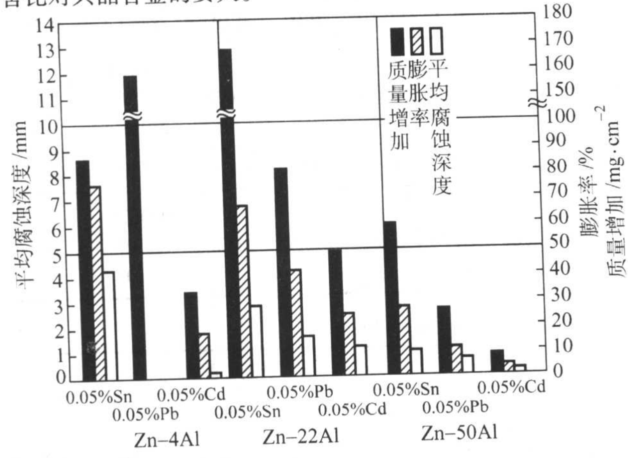


图 6.1-17 含 0.05%Pb，0.05%Sn，0.05%Cd 的 Zn-Al 合金在 95℃水蒸气中的膨胀、质量增加和平均腐蚀深度

In，Te，Bi 杂质对 Zn-Al 合金加速晶间腐蚀，其中 In 危害最大，不过纯锌中 In 很少出现。

Be，Ce，Cr，Li 等元素能改善 Zn-Al 合金的耐蚀性能，Li 可达到与 Mg 同样的效果。

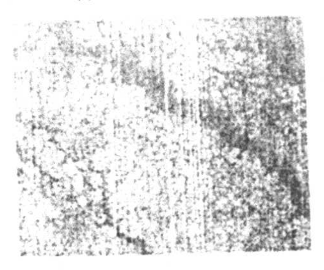
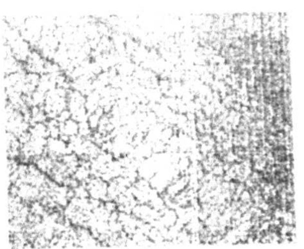
Cu 和 Mg 都是改善 Zn-Al 合金耐蚀性的元素。不过 Cu 含量过高会降低合金的尺寸稳定性。

3 铸造锌合金

3.1 铸造锌合金的牌号、成分及性能

3.1.1 铸造锌合金的发展及其优点

19 世纪末 20 世纪初，由于压铸机的发明，出现含 6% Sn、3% Cu 和 0.5% Al 的锌合金，主要用来代替部分锡基压铸印刷型板，其性能又好又便宜。为了减少熔锅、模具和工具的浸蚀，提高含铝量，发现铸造性能大为改善，还能细化晶粒，提高强度。于是乎大胆地取消了锡，形成新的 Zn-Al 合金系。1918 年 Zn-10Al-0.5Cu 压铸合金开始使用。不久，人们发现合金在湿热大气中易膨胀、变形，严重时甚至破裂（见图 6.1-18）。从此，压铸锌合金不再受欢迎，停止了进步。这是因为冶炼技术还不能使锌中杂质 Sn，Pb 减少到无大影响的纯度，Sn 和 Pb 杂质是祸根，它们显著加速晶间腐蚀（“老化”）。直到 99.99%高纯锌能大量生产供应，铸造锌合金才又获得新生。在此之前，人们为了寻找能改善 Zn-Al 合金的耐蚀性能时，发现 Mg，Cu 有良的效果，从此 Zn-Al 合金成分才基本定型。

(a) 显微组织



(b) 实物照片

图 6.1-18 杂质过多造成的晶间腐蚀
(a) 显微组织；(b) 实物照片

美国新泽西锌公司研制成第一个标准化的压铸锌合金是 Zn-4Al-3Cu。该合金在共晶成分附近，力学性能、压力铸造性能和流动性能均较好。但仍有较大的晶间腐蚀倾向，加 0.1%Mg 进行改善，出现了 Zamak-2（2 号）商业压铸锌合金。因为合金中含 3% Cu，在时效过程中尺寸有变化，抗拉强度降低。1930 年又研制出不含铜的 Zamak-3 合金（Zn-4Al-0.1Mg），它有足够的抗拉强度和较好的耐蚀性能。在使用过程中发现镁使铸件易产生热裂，后来将 Zamak-2（2 号）中含镁量改为 0.03%，Zamak-3（3 号）改为 0.04%。随后发现了一系列的压铸锌合金。

第二次世界大战期间，德国率先使用重力铸造锌合金代替铜合金，尤其是代替青铜作轴承材料。战后基本停止了使用，直到 20 世纪 50 年代末出现国际性的铜、锡资源紧缺的局面。1959 年国际铅锌研究会（ILZRO）在新泽西锌公司确定锌合金研制计划，于 1962 年研究出 ILZRO-12 重力铸造锌合金，其成分为 Zn-12Al-0.75Cu-0.015Mg。因冲击性能较差，加拿大 Noranda 研究中心将铝降为 11%，称 ZA12 合金。后来又推出 ZA8 和 ZA27 合金。这几个锌合金本来是为重力铸造研制的，现在除 ZA27 合金外（可冷室压力铸造）均可以用于热室压力铸造。

铸造锌合金有很多突出的优点。

1）锌合金流动性和凝固特性优良，可铸造出极薄（壁厚 1.5~2 mm）、尺寸精确和表面光洁的零件，这一点是铝合金和铜合金所无法比拟的。

2）熔点低，熔炼时氧化轻；消耗能源少；设备寿命长；生产成本低。

3）适合各种方法铸造成形，如压力铸造、重力铸造（金属型铸造、石膏型铸造以及砂型铸造）和离心铸造等。

4）加工性能好，切削加工效率高，刀具磨损轻，零件

表面粗糙度小。

5）零件表面可以进行各种装饰加工，如电镀、涂漆、阳极氧化、着色、抛光等。

3.1.2　铸造锌合金的牌号、成分和性能

（1）铸造锌合金的牌号和化学成分

我国铸造锌合金及压力铸造锌合金的牌号和化学成分见表6.1-15及表6.1-16。

铸造锌合金锭化学成分见表6.1-17。

美国铸造锌合金零件及铸锭的化学成分见表6.1-18和表6.1-19。

表6.1-15　铸造锌合金的化学成分（摘自GB/T 1175—1997）

合金牌号	合金代号	主要成分/%				其他元素/% ≤					
		Al	Cu	Mg	Zn	Fe	Pb	Cd	Sn	其他	总和
ZZnAl4Cu1Mg	ZA4-1	3.5~4.5	0.75~1.25	0.03~0.08	其余	0.1	0.015	0.005	0.003	—	0.2
ZZnAl4Cu3Mg	ZA4-3	3.5~4.3	2.5~3.2	0.03~0.06	其余	0.075	Pb+Cd 0.009		0.002	—	—
ZZnAl6Cu1	ZA6-1	5.6~6.0	1.2~1.6	≤0.005	其余	0.075	Pb+Cd 0.009		0.002	—	—
ZZnAl8Cu1Mg	ZA8-1	8.0~8.8	0.8~1.3	0.015~0.030	其余	0.075	0.006	0.006	0.003	Mn0.01 Cr0.01 Ni0.01	
ZZnAl9Cu2Mg	ZA9-2	8.0~10.0	1.0~2.0	0.03~0.06	其余	0.2	0.03	0.02	0.01	Si0.1	0.35
ZZnAl11Cu1Mg	ZA11-1	10.5~11.5	0.5~1.2	0.015~0.030	其余	0.075	0.006	0.006	0.003	Mn0.01 Cr0.01 Ni0.01	
ZZnAl11Cu5Mg	ZA11-5	10.0~12.0	4.0~5.5	0.03~0.06	其余	0.2	0.03	0.02	0.01	Si0.05	0.35
ZZnAl27Cu2Mg	ZA27-2	25.0~28.0	2.0~2.5	0.010~0.020	其余	0.075	0.006	0.006	0.003	Mn0.01 Cr0.01 Ni0.01	—

表6.1-16　压铸锌合金的化学成分（摘自GB/T 13818—1992）

合金牌号	合金代号	主要成分/%				其他元素/%≤				
		Al	Cu	Mg	Zn	Fe	Pb	Sn	Cd	Cu
ZZnAl4Y	YX040	3.5~4.3	—	0.03~0.08	其余	0.1	0.005	0.003	0.004	0.25
ZZnAl4Cu1Y	YX041	3.5~4.3	0.75~1.25	0.03~0.08	其余	0.1	0.005	0.003	0.004	—
ZZnAl4Cu3Y	YX043	3.5~4.3	2.5~3.0	0.02~0.06	其余	0.1	0.005	0.003	0.004	—

表6.1-17　铸造锌合金锭（摘自GB 8738—88）

牌号	化学成分（质量分数）/%								分类用途
	主要成分				杂质含量≤				
	Al	Cu	Mg	Zn	Fe	Pb	Cd	Sn	
ZZnAlD4A	3.9~4.3	—	0.03~0.06	余量	0.03	0.003	0.003	0.001	用于压铸较大铸件及仪表、汽车零件外壳
ZZnAlD4		—			0.1	0.005	0.003	0.002	
ZZnAlD4-0.1	3.5~4.3	0.10~0.15	0.05~0.1		0.1	0.005	0.003	0.003	
ZZnAlD4-0.5		0.5~0.9	0.08~0.15		0.1	0.015	0.01	0.005	广泛用于压铸零件
ZZnAlD4-1A	3.9~4.3	0.50~1.25	0.03~0.06		0.03	0.003	0.003	0.001	广泛用于压铸零件，复杂形状铸件
ZZnAlD4-1					0.1	0.005	0.003	0.002	
ZZnAlD4-3A		2.50~3.50			0.05	0.003	0.003	0.001	用于压铸各种零件
ZZnAlD4-3					0.1	0.005	0.003	0.002	
ZZnAlD5-1	4.5~6.0	0.8~1.8	0.02~0.05		0.1	0.03	0.005	0.005	用于硬模铸造及压铸零件
ZZnAlD5-5-1	4.5~5.5	4.5~5.5	—		0.1	—	0.005	0.002	用于铸造矿山圆锥破碎机护板
ZZnAlD6-4	6.5~7.5	3.5~4.5	0.03~0.06		0.2	0.007	0.005	0.002	用于军械零件、仪表零件、印刷用字

续表 6.1-17

牌号	化学成分（质量分数）/%								分类用途
	主要成分				杂质含量≤				
	Al	Cu	Mg	Zn	Fe	Pb	Cd	Sn	
ZZnAlD9-1.5	9.0~11.0	1.0~2.0	0.03~0.06	余量	0.1	0.02	0.005	0.005	用于复杂形状铸件及轴承
ZZnAlD10-1		0.6~1.0	0.02~0.05		0.1	0.03	0.015	0.01	用于轴承
ZZnAlD10-2	9.0~12.0	1.5~2.5	0.03~0.06		0.2	0.03	0.02	0.01	用于制造机床、水泵等轴承
ZZnAlD10-5		4.0~5.5			0.1	0.02	0.015	0.01	用于轴承
ZZnAlD11-1	10.5~11.5	0.5~1.25	0.015~0.03		0.075	0.004	0.003	0.002	用于硬模铸件

注：1. 在主要成分中，ZZnAlD5-5-1另含铅0.5%~1.5%。
2. 在杂质中ZZnAlD4A、ZZnAlD4允许含铜≤0.03%；ZZnAlD9-1.5、ZZnAlD10-5允许含硅≤0.03%。

表 6.1-18 美国铸造锌合金的化学成分

牌号	化学成分（质量分数）/%								
	Cu	Al	Mg	Fe	Pb	Cd	Sn	Ni	Zn
铸件（ASTM B 86）									
AG40A（3号）	<0.25	3.5~4.3	0.020~0.05	<0.100	<0.005	<0.004	<0.003	—	余量
AG40B（7号）	<0.25	3.5~4.3	0.005~0.020	<0.075	<0.003	<0.002	<0.001	0.005~0.020	余量
AC41A（5号）	0.75~1.25	3.5~4.3	0.03~0.08	<0.100	<0.005	<0.004	<0.003	—	余量
AC43A（2号）	2.5~3.0	3.5~4.3	0.020~0.050	<0.100	<0.005	<0.004	<0.003	—	余量
铸锭（ASTM B 240）									
AG40A（3号）	<0.1	3.9~4.3	0.025~0.05	<0.075	<0.004	<0.003	<0.002	—	余量
AG40B（7号）	<0.1	3.9~4.3	0.010~0.02	<0.075	<0.002	<0.002	<0.001	0.005~0.020	余量
AC41A（5号）	0.75~1.25	3.9~4.3	0.03~0.06	<0.075	<0.004	<0.003	<0.002	—	余量
AC43A（2号）	2.6~2.9	3.9~4.3	0.025~0.05	<0.075	<0.004	<0.003	<0.002	—	余量

注：1. 合金中可能含有Ni、Cr、Si和Mn，其含量分别不大于0.02%、0.02%、0.035%和0.06%时，未发现有害作用，对这些元素不要求分析。
2. 3号和7号合金中含铜量为0.25%~0.75%，不会产生不良影响，不能作拒收理由。

表 6.1-19 美国Zn-Al系铸造锌合金的化学成分

牌号	化学成分（质量分数）/%				杂质（质量分数）/%≤			
	Al	Cu	Mg	Zn	Fe	Pb	Cd	Sn
铸件（ASTM B 86）								
ZA8	8.0~8.8	0.8~1.3	0.015~0.030	余量	0.075	0.006	0.006	0.003
ZA12	10.5~11.5	0.5~1.2	0.015~0.030	余量	0.075	0.006	0.006	0.003
ZA27	25.0~28.0	2.0~2.5	0.010~0.020	余量	0.075	0.006	0.006	0.003
铸锭（ASTM B 240）								
ZA8	8.2~8.8	0.8~1.3	0.020~0.030	余量	0.065	0.005	0.005	0.002
ZA12	10.8~11.5	0.5~1.2	0.020~0.030	余量	0.065	0.005	0.005	0.002
ZA27	25.5~28.0	2.0~2.5	0.012~0.020	余量	0.072	0.005	0.005	0.002

目前，在我国已建立一些铸造锌合金锭生产厂，大的锌冶炼厂都在生产或正在谋求生产铸造锌合金锭供应市场，而锌合金铸造厂也成批采购铸造锌合金锭，因此同一个牌号铸造锌合金，零件成分和铸锭成分有些差异，见表6.1-18和表6.1-19，铸锭的成分控制是更严格的。我国铸造锌合金和压力铸造锌合金化学成分先后于1997年和1992年进行了修订，而GB/T 8738—1988铸造锌合金锭尚未见到修订稿，这件事应该认为是重要的。

我国与世界各国铸造锌合金牌号对照见表6.1-20。

表 6.1-20 世界各国铸造锌合金的牌号对照表

合金牌号	合金代号	相近国外牌号				
中国(GB/T 1175—1997)		美国	俄罗斯	德国	英国	日本
ZZnAl4Cu1Mg	ZA4-1	AC41A	ЦАМ 4-1	GD-ZnAl4Cu1	BS 1004B	ZDC1
ZZnAl4Cu3Mg	ZA4-3	AC43A	—	G-ZnAl4Cu3 GK-ZnAl4Cu3	—	—

续表 6.1-20

合金牌号	合金代号	相近国外牌号				
中国(GB/T 1175—1997)		美国	俄罗斯	德国	英国	日本
ZZnAl6Cu1	ZA6-1	—	—	G-ZnAl6Cu1 GK-ZnAl6Cu1	—	—
ZZnAl18Cu1Mg	ZA8-1	ZA8	ЦАМ9-1.5	—	—	—
ZZnAl11Cu1Mg	ZA11-1	ZA12	—	—	—	—
ZZnAl11Cu5Mg	ZA11-5	—	ЦАМ10-5	—	—	—
ZZnAl27Cu2Mg	ZA27-2	ZA27	—	—	—	—
ZZnAl4Y①	YX040	AG40A	—	—	—	—

① 根据 GB/T 13818—1992。

(2) 铸造锌合金的力学性能

铸造锌合金的力学性能见表 6.1-21 和表 6.1-22。

表 6.1-21 铸造锌合金力学性能(摘自 GB/T 1175—1997)

序号	合金牌号	合金代号	铸造方法及状态	抗拉强度≥ σ_b/MPa	伸长率≥ δ_5/%	布氏硬度 HBS
1	ZZnAl4Cu1Mg	ZA4-1	J、F	175	0.5	80
2	ZZnAl4Cu3Mg	ZA4-3	S、F	220	0.5	90
			J、F	240	1	100
3	ZZnAl6Cu1	ZA6-1	S、F	180	1	80
			J、F	220	1.5	80
4	ZZnAl8Cu1Mg	ZA8-1	S、F	225	1	80
			J、F	250	1	85
5	ZZnAl9Cu2Mg	ZA9-2	S、F	275	0.7	90
			J、F	315	1.5	105
6	ZZnAl11Cu1Mg	ZA11-1	S、F	280	1	90
			J、F	310	1	90
7	ZZnAl11Cu5Mg	ZA11-5	S、F	275	0.5	80
			J、F	295	1.0	100
8	ZZnAl27Cu2Mg	ZA27-2	S、F	400	3	110
			S、T3	310	8	90
			J、F	420	1	110

注:1. 工艺代号: S—砂型;J—金属型;F—铸造;T3—均匀化处理。
2. T3 工艺为 320℃,加热 3 h,随炉冷却。

表 6.1-22 压铸锌合金的力学性能(摘自 GB/T 13818—1992)

合金牌号	合金代号	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%	硬度 HBS	冲击韧度 a_K/kJ·m^{-2}
		≥			
ZZnAl4Y	YX040	255	1	80	35
ZZnAl4Cu1Y	YX041	270	2	90	39
ZZnAl4Cu3Y	YX043	320	2	95	42

美国铸造锌合金力学性能见表 6.1-23。

表 6.1-23 美国铸造锌合金室温力学性能

合金牌号(编号)	抗拉强度① /MPa	冲击韧度② /J	断裂韧度 K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$ 压力铸造	砂型铸造
压铸锌合金				
AC43A(2号)	359	47.5	—	—
AG40A(3号)	282.7	58.3	12.3	11.2
AC41A(5号)	328.2	65.1	—	—
AG40B(7号)	282.7(0℃)	3.8(℃)	—	—
锌铝铸造合金				
ZA8	373.7	42	12.6	—
ZA12	403.4	29	14.4	14.5
ZA27	425.4	13	20.2	23.7

① 铸造状态;
② 铸造状态,无缺口的 6.35 mm×6.35 mm 方型试样。

(3) 铸造锌合金的物理性能

铸造锌合金的物理性能见表 6.1-24。

3.1.3 铸造锌合金的特点和用途

铸造锌合金的特点和用途见表 6.1-25。

表 6.1-24 铸造锌合金的物理性能

合金牌号	20℃时的密度 /g·cm^{-3}	热导率 /W·(m·K)$^{-1}$	线胀系数 (20~100℃) α/10^{-6}K^{-1}	比热容 c (24~29℃) /J·(kg·K)$^{-1}$	电导率 γ /%IACS①	凝固温度范围 /℃
ZZnAl4Cu1Mg(ZA4-1)	6.7	109	27.0	418.7	26	379~388
ZZnAl4Cu3Mg(ZA4-3)	6.8	105	26~29	419	25	378~390
ZZnAl8Cu1Mg(ZA8-1)	6.3	115	23.2	435	27.7	375~404
ZZnAl9Cu2Mg(ZA9-2)	6.2	—	26.9	—	—	380~410
ZZnAl11Cu1Mg(ZA11-1)	6.0	116	24.1	450	28.3	377~432
ZZnAl11Cu5Mg(ZA11-5)	6.3	100.5	27.0	—	—	378~395
ZZnAl27Cu2Mg(ZA27-2)	5.0	125.5	25.9	525	29.7	375~487

① %IACS 相对于标准退火铜线电导率的百分比。

表 6.1-25 铸造锌合金的特点和用途

合金代号	特点和用途
ZA4-1	铸造性能及耐蚀性能好、强度较高，但尺寸稳定性稍差，适用于汽车、拖拉机、电气等工业部门，不要求高精度的装饰性零配件及壳体铸件
ZA4-3	铸造性能好、强度较高，常用作模具，如注塑模、吹塑模及简易冲压模具等。还可用于汽车及其他工业部门的各种砂型及金属型铸件
ZA6-1	铸造性能好，用于技术难度要求高的砂型和金属型铸件如军械铸件、仪表铸件
ZA9-2 ZA11-5	铸造性能好，强度较高、耐磨性较好，可用作锡青铜及低锡轴承合金的代用品，制造在80℃以下工作的各种起重运输设备、机床、水泵、鼓风机等的轴承
ZA8-1	铸造性能好，特别适用于金属型铸造，也可用于热室压力铸造，如管接头、阀、电气开关和变压器铸件，工业用滑轮和带轮、客车和运输车辆零件、灌溉系统零件和小五金零件
ZA11-1	铸造性能好，强度较高，耐磨性能好，适合于金属型、砂型铸造，也可用于冷室压力铸造。可制造有润滑的轴承、轴套、抗擦伤的耐磨零件、气压及液压配件、工业设备及农机具零件、运输车辆和客车零件
ZA27-2	质量较轻、强度高、耐磨性能好、工作温度可至150℃。可用于砂型、金属型铸造，也可用冷室压力铸造。适合于制造高强度薄壁零件、抗擦伤的耐磨零件、轴套、气压及液压配件、工业设备及农机具零件、运输车辆和客车零件

3.2 压力铸造锌合金

锌合金用于压力铸造（压铸）有近百年的历史。以前所用的锌合金基本上是亚共晶的 Zn-Al-Cu，有的不含铜，多数的加不同百分数的铜。后来又将一系列的过共晶成分合金用于压力铸造。这些过共晶合金的抗拉强度，耐磨性能比亚共晶合金的好。

3.2.1 压铸锌合金的组织和性能

锌合金熔点低，耗能少，不污染环境。锌合金流动性能好，可铸造出薄壁尺寸精确的零件，拔模斜度要求很小甚至可以没有。

锌合金压铸件，由于冷却的快，尺寸和性能随时间延长变化很小。如果零件要求尺寸和性能很稳定，需要进行稳定化处理。稳定化处理温度不能超过100℃。通常的作法是在100℃加热3~6 h，或70℃加热10~12 h。

ZA27-2合金，熔化温度高，引起工具腐蚀。另外，ILZRO-14和ILZRO-16合金，也腐蚀工具，所以必须在冷室压铸机中铸造。

压铸锌合金 YX043（ZA4-3）和 YX041（ZA4-1）的组织见图6.1-19和图6.1-20。

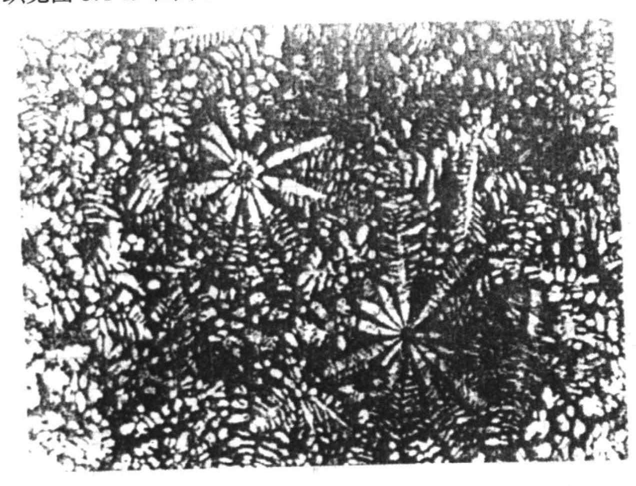


图 6.1-19 ZA4-3合金金相照片
浸蚀剂：氧化铬硫酸水溶液 处理情况：金属型铸造状态
合金组织：η（Zn）初晶+共晶体 放大倍数：100×



图 6.1-20 ZA4-1合金金相照片
浸蚀剂：氧化铬硫酸水溶液
处理情况：压铸状态
合金组织：η（Zn）初晶+共晶体
放大倍数：250×

压力铸造锌合金零件的强度与其厚度有关，零件越薄强度越高，见图6.1-21。

在100℃下保温时间对压铸锌合金抗拉强度的影响见图6.1-22。

温度对 YX040 和 YX041 合金力学性能影响见图6.1-23。自然时效和稳定化处理对 YX040 和 YX041 合金力学性能及尺寸变化的影响见表6.1-26和表6.1-27。

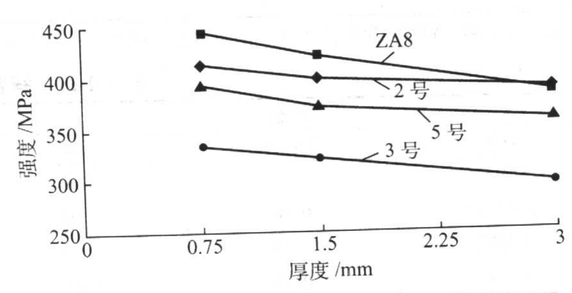


图 6.1-21 厚度对锌压铸合金强度的影响

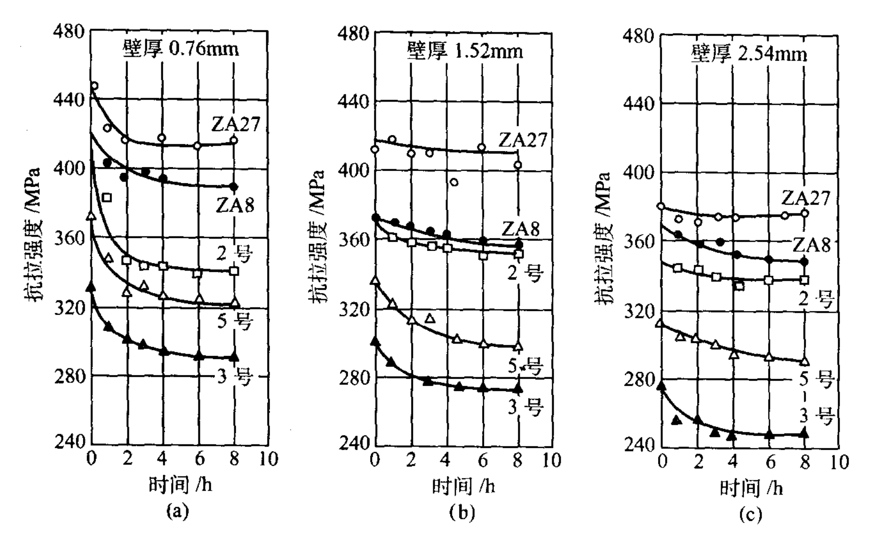


图 6.1-22　在 100℃下保温时间对压铸锌合金抗拉强度的影响

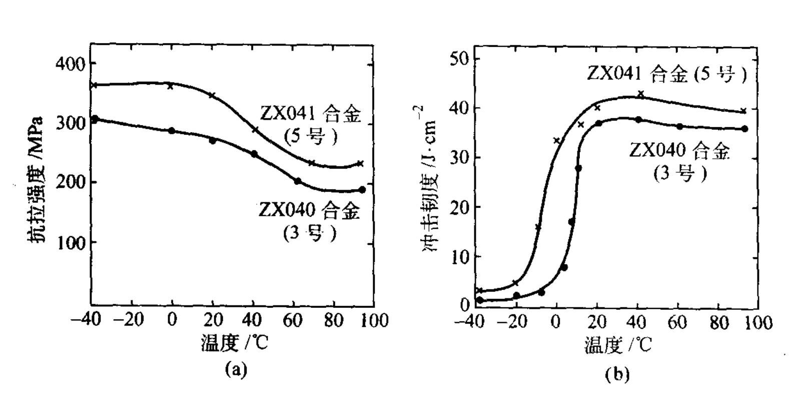


图 6.1-23　温度对锌合金力学性能的影响

表 6.1-26　时效对 YX040 和 YX041 合金室温（20℃）力学性能的影响

状态	抗拉强度 σ_b/MPa				伸长率 δ/%				冲击韧度 a_K/kJ·m^{-2}				硬度 HB			
	YX040	YX040（W）	YX041	YX041（W）	YX040	YX040（W）	YX041	YX041（W）	YX040	YX040（W）	YX041	YX041（W）	YX040	YX040（W）	YX041	YX041（W）
初始值（压铸后3周）	286	273	335	312	15	17	9	10	141	171	228	141	83	69	92	83
自然时效（12个月后）	264	264	320	290	25	24	12	14	144	134	184	179	67	54	74	72
自然时效（5年后）	260	242	295	—	27	19	12	—	146	151	191	—	65	61	77	—
自然时效（8年后）	247	—	292	—	20	—	14	—	149	—	184	—	65	—	74	—
95℃、干燥空气时效12个月后	—	232	—	245	—	30	—	20	—	124	—	141	—	50	—	57

注：YX040、YX041 为压铸状态；W 表示稳定化状态：100℃ ± 5℃、加热 6 h，空冷。

表 6.1-27　锌合金压铸件的尺寸收缩　mm·m^{-1}

铸态			稳定化处理①后		
时间	YX040	YX041	时间	YX040	YX041
5周后	0.32	0.69	5周后	0.20	0.22
6个月后	0.56	1.03	3个月后	0.30	0.26
5年后	0.73	1.36	2年后	0.30	0.27
8年后	0.79	1.41	—	—	—

①　100℃ ± 5℃、加热 6 h，空冷。

时效对 ZA27－2、ZA11－1 和 ZA8－1 合金尺寸变化及力学性能的影响见图 6.1-24。

压力铸造锌合金的抗拉强度随 Al 和 Cu 的含量增加而提高，但随温度的增加而降低，导致合金使用温度最好不超过 100℃，150℃已是临界状态，见图 6.1-25。

压铸锌合金 YX040（3号）和 YX041（5号）的室温蠕变特性见图 6.1-26。YX040、ZA8－1 和 ZA27－2 合金在不同温度不同应力作用下，工作 3 000 h 后的蠕变伸长率见图 6.1-27～图 6.1-29。

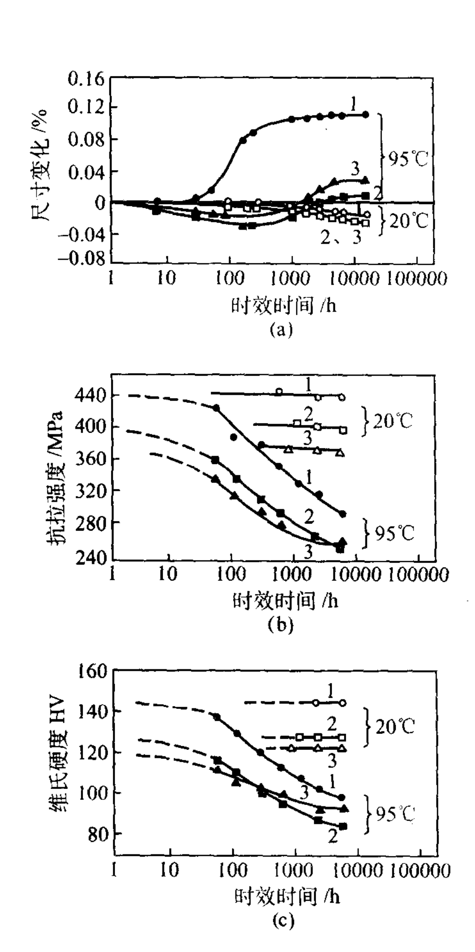


图 6.1-24　时效对（压铸）锌合金尺寸和力学性能的影响

1—ZA27－2；2—ZA11－1；3—ZA8－1

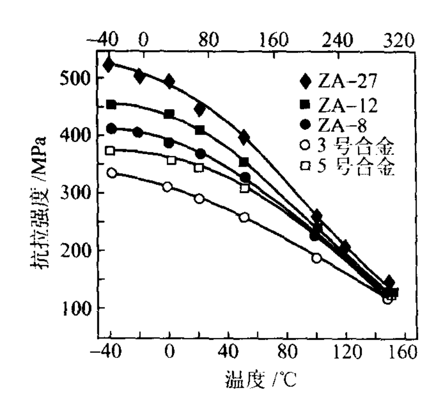
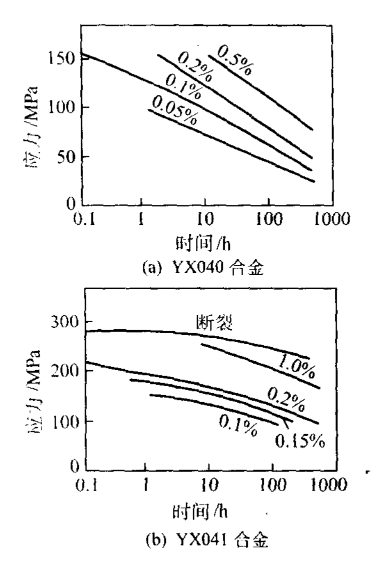


图 6.1-25　温度和成分对压铸锌合金抗拉强度的影响



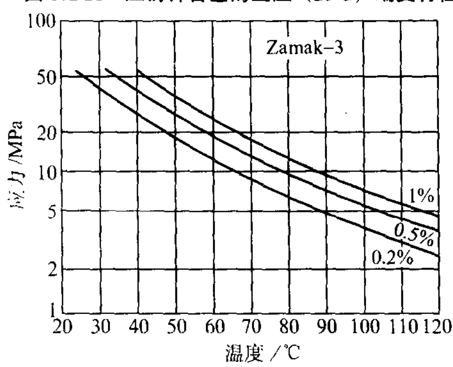


图 6.1-26　压铸锌合金的室温（20℃）蠕变特性

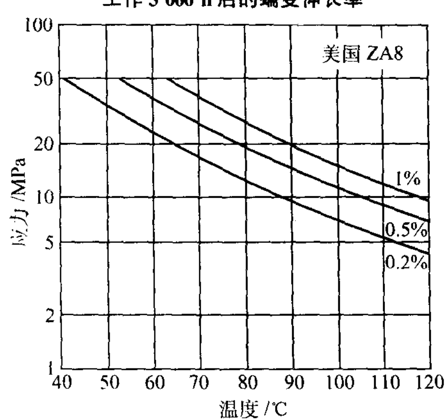


图 6.1-27　YX040（3号合金）压铸态在不同温度不同应力作用下，工作 3 000 h 后的蠕变伸长率

图 6.1-28　ZA8－1 合金压铸态在不同温度不同应力作用下，工作 3 000 h 后的蠕变伸长率

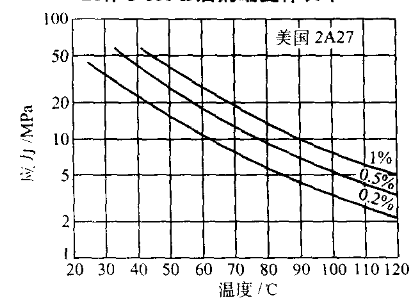


图 6.1-29　ZA27－2 合金压铸态在不同温度不同应力作用下，工作 3 000 h 后的蠕变伸长率

3.2.2 压铸锌合金的特点及用途

1）压铸锌合金中应用最广泛、用量最大的 YX040（Zamak-3，常称3号锌合金）是亚共晶锌合金，加少量镁。也是铸造锌合金标准（GB/T 1175—1997，GB/T 13818—1992）中惟一不含铜的合金。这个合金综合性能好，集抗拉强度较高、铸造性能好、尺寸稳定、表面加工容易和成本低廉于一身。因此是设计者和应用者首选的压铸锌合金。

这种合金多用于要求综合性能好的零部件，如手表、玩具、灯具、装饰品、电器元件、办公室用品及仪器仪表和汽车零件等。

2）YX041（Zamak-5，也称5号锌合金）合金，是在 YX040 合金基础上加0.75%～1.25% Cu 构成的。也是亚共晶型锌合金。它的硬度和强度以及耐磨性都比 YX040 合金好，但其塑性不如 YX040 合金。二次成形（如铆接、模锻等）需注意皱缩。YX041 合金的抗蠕变性能，在亚共晶型锌合金中仅次于 YX043（Zaman-2）合金。

这个合金经常被选用对强度有一定要求的汽车零件、建筑五金、机电配件、机械零件、电器元件、计算机及仪器仪表零件等。

3）YX043（Zamak-2，又称2号合金）合金，含2.5%～3.0% Cu，是亚共晶型锌合金中含铜量最多的合金。由于合金组织中存在 ε 相，其抗拉强度、蠕变强度、硬度及耐磨性是这类锌合金中最高的，承载能力也良好。其缺点是因为含铜量达3%，导致尺寸和性能不稳定，冲击韧度和伸长率降低。

这种锌合金的应用范围与 YX041（5号）合金相同。

4）国外还有个 Zamak-7（7号）合金，它实际上是 Zamak-3（YX040）合金，只不过含镁量较低（0.005%～0.020%）。该合金铸造性能优于 YX040 合金，可铸造表面要求花纹非常清晰的零件。在亚共晶型锌合金中塑性最好，它的用途除与 YX040 合金相同外，特别是常用于在装配时需要允许变形的零件。

5）ZA8-1（美国 ZA8）合金，这是过共晶型 Zn-Al 系合金，也是惟一的能与亚共晶型锌合金一样，可进行热室铸造。该合金在很多方面类似 YX043 合金，但它的抗拉强度、疲劳强度和蠕变极限都更好。这个合金铸造的零件可进行冷精加工，因此它不但结构强度高，而且外观美丽。由于流动性差，多用于压铸尺寸小，精度和强度要求高的零件，如小的高精度电器元件，电子电器设备及仪器仪表配件，计算机、录音机、收音机零件，汽车及农用设备零件，家庭及园艺用品和手工工具等。

6）ZA11-1（美国 ZA12）合金，由于含铝量高，熔化浇注温度高，适于冷室压力铸造，铸造性能好。其密度（除 ZA27-2，美国 ZA27 合金）比其他压力铸造锌合金都小，当对铸件要求质量小、比强度大时，经常被首选。其耐蚀性能好，可镀性比ZA8-1合金差。

该合金常用于制造要求强度大的零件以及与 ZA8-1 合金用途相同的零件。

7）ZA27-2（美国 ZA27）合金，这是锌合金中密度最小、抗拉强度和硬度最高的合金，耐蚀性也好。适于冷室压力铸造，其塑性和冲击韧度较低。由于 ZA27-2 合金结晶温度间隔大，如果不注意，其铸件品质可能受到影响。ZA27-2 合金的二次蠕变极限，除现在很少使用的 ILZRO-16 合金外，比其他合金都好。

在铸造锌合金中，ZA27-2 合金有最好的音响和振动阻尼特性。

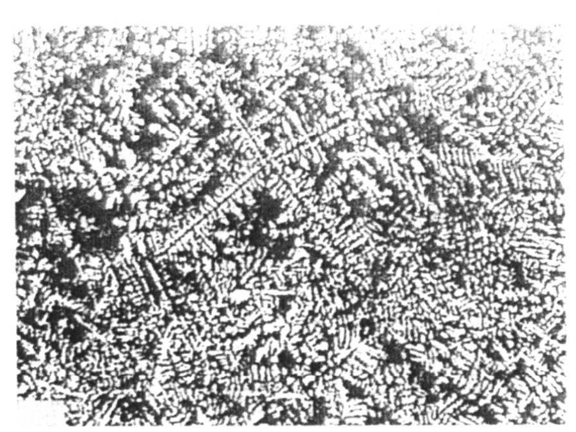
3.3 重力铸造锌合金

在20世纪60年代以前，没有被认可的重力铸造锌合金。1962年 ILZRO（国际铅锌研究会）首次研制成功 ILZRO-12（ZA12）合金，随后 ZA8 和 ZA27 相继出现。ZA12 合金最初是作为压铸合金推出的，ZA27 合金则是专门作为砂型铸造而研制的，ZA8 合金为永久型铸造合金。现在这三种合金除用于重力铸造而外，广泛地应用于压力铸造。由于含铝量的关系，除 ZA8（我国 ZA8-1）合金用于热室压力铸造外，ZA12（我国 ZA11-1）和 ZA27（我国 ZA27-2）均用于冷室压力铸造。

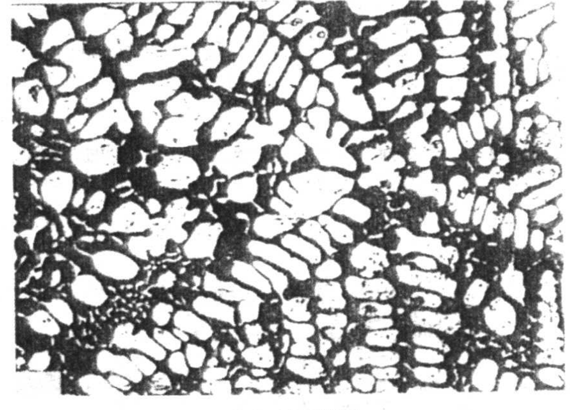
3.3.1 重力铸造锌合金的组织和性能

常用重力铸造锌合金一般含铝量较多，如 ZA8-1 合金含8.0%～8.8% Al，ZA11-1 合金含 10.5%～11.5% Al，ZA27-2 合金含 25.0%～28.0% Al。这些都是过共晶类型合金，随着合金含铝量的提高，结晶温度间隔越来越大，ZA8-1 合金为29℃，ZA11-1 合金为 45℃，而 ZA27-2 合金为 108℃。众所周知，结晶温度间隔越大，流动性越差，凝固收缩产生问题越多。这一点给重力铸造带来一定的困难，即如何能获得良好的流动性和均衡地较快地使合金零件凝固。

ZA8-1 合金组织为初生相 α_2 和共晶体 $\alpha_2+\eta$（Zn），因加了 Cu，有 ε 相产生。α_2 相在 275℃发生偏析分解（$\alpha_2\rightarrow\alpha_1+\eta$（Zn））。金相组织照片见图 6.1-30。



(a) 金属型铸造



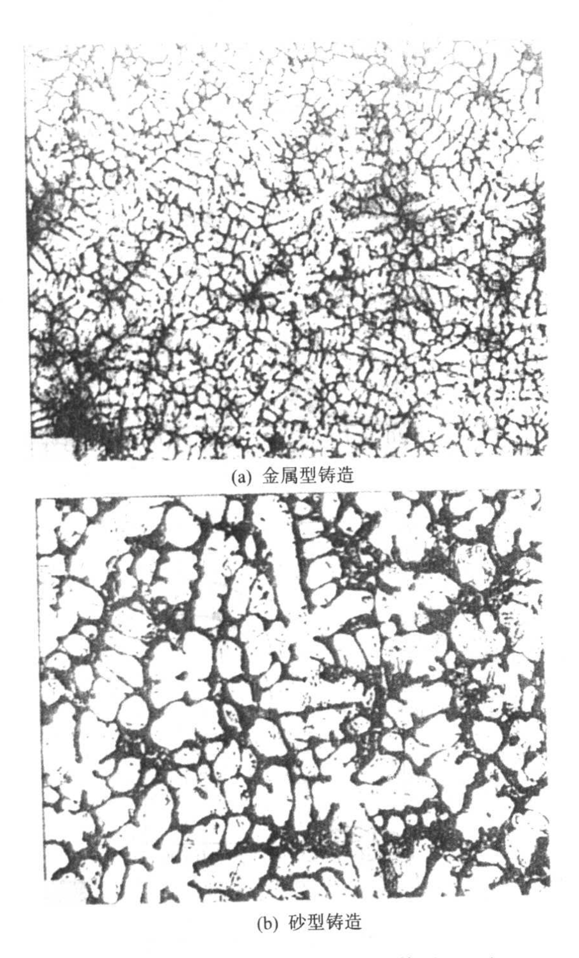
(b) 砂型铸造

图 6.1-30　ZA8-1 合金金相照片（100×）
浸蚀剂：氧化铬硫酸水溶液

ZA11-1 合金含 Al 是比 ZA8-1 多，α_2 相也多。金相组织照片见图 6.1-31。

ZA27-2 合金是目前铸造锌合金中含铝量最多的合金，金相组织照片见图 6.1-32。组织中有 α、$CuAl_2$ 和 η（Zn）固溶体三种相。

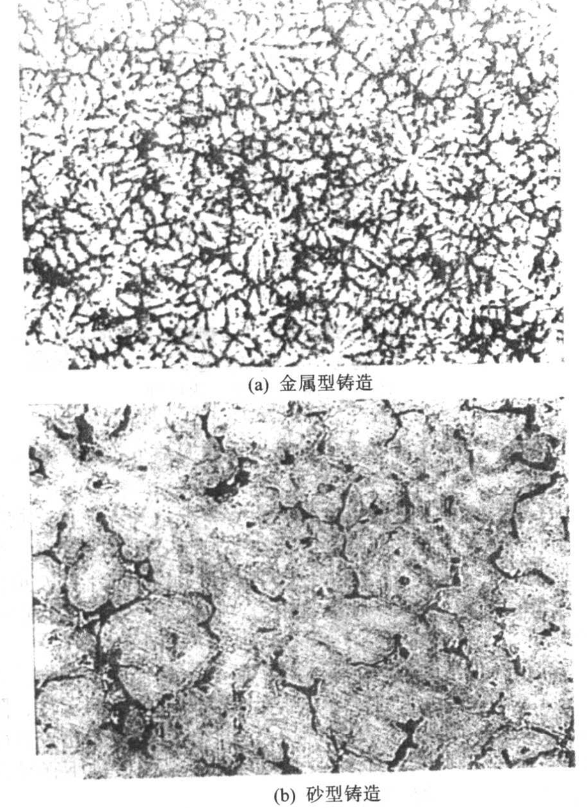
砂型铸造锌合金的流动性与浇注温度的关系见图 6.1-33。



(a) 金属型铸造

(b) 砂型铸造

图6.1-31　ZA11－1合金金相照片（100×）
浸蚀剂：氧化铬硫酸水溶液



(a) 金属型铸造

(b) 砂型铸造

图6.1-32　ZA27－2合金金相照片（100×）
浸蚀剂：氧化铬硫酸水溶液

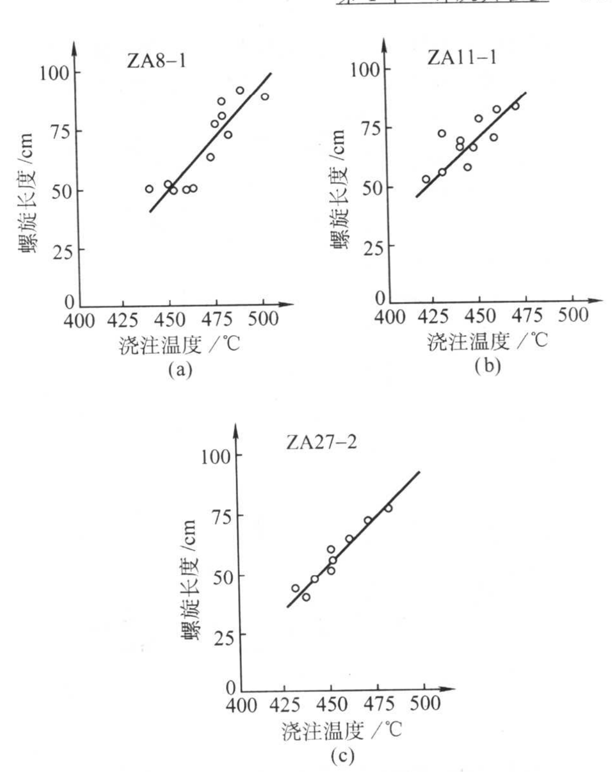


图6.1-33　砂型铸造锌合金的流动性与浇注温度的关系

这些合金的铸件尺寸和形状虽然不同，其显微组织的相组成是相同的。其力学性能与铸造工艺有关系，合金凝固时冷却速度越快，合金组织中的枝晶臂间距越小，力学性能就越好，见图6.1-34和图6.1-35。

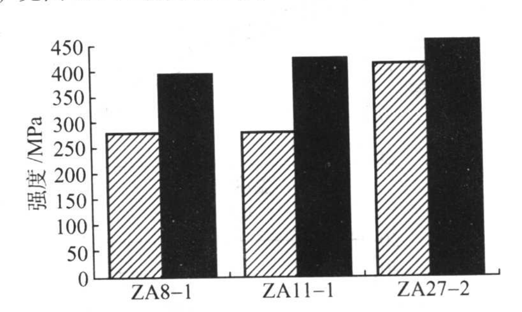


图6.1-34　铸造工艺对ZA8－1，ZA11－1和ZA27－2合金强度的影响
▨砂型铸造；■压力铸造

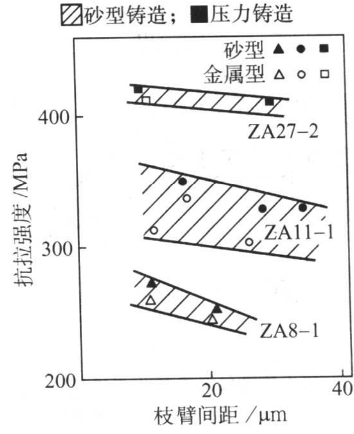


图6.1-35　枝臂间距（DAS）对砂型、金属型铸造的锌合金抗拉强度的影响

合金元素Mg和Cu对ZA27－2合金铸造状态和时效状态

的力学性能影响见图6.1-36，可供调整合金成分参考。合金的力学性能随温度改变，一般是强度和硬度随温度升高而降低，伸长率正相反，见图6.1-37。

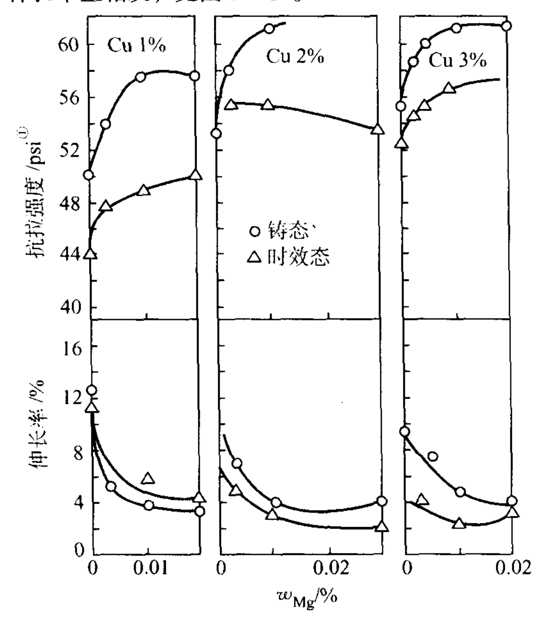


图6.1-36　Mg含量及时效（95℃，10 d）对含(1~3)%Cu的Zn-27Al合金拉伸性能的影响

① 1 psi = 6.895 MPa

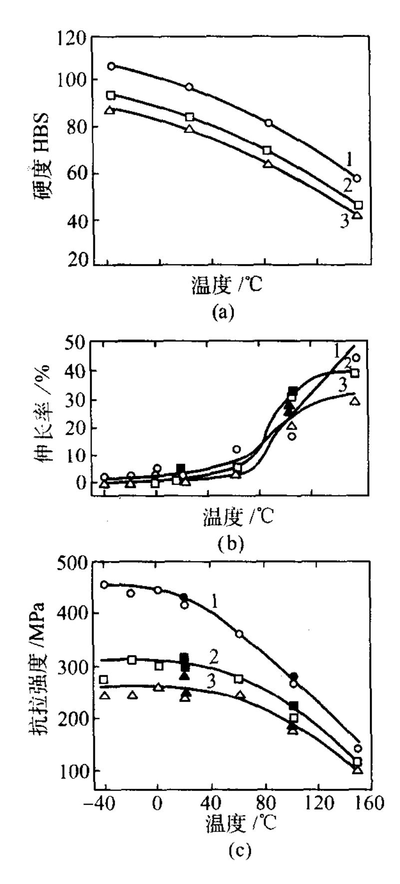


图6.1-37　重力铸造锌合金的力学性能与温度的关系

1—ZA27-2 (S)；2—ZA11-1 (S)；3—ZA8-1 (J)

冲击韧度是铸造合金重要指标，不是强度和硬度越高越好，应该是强度、硬度、伸长率、疲劳性能和冲击韧度综合指标最佳，或根据客观需要选择那一项或几项指标优化。应该说冲击韧度可基本代表着合金的强韧化指标。合金的冲击韧度与温度的关系见图6.1-38。

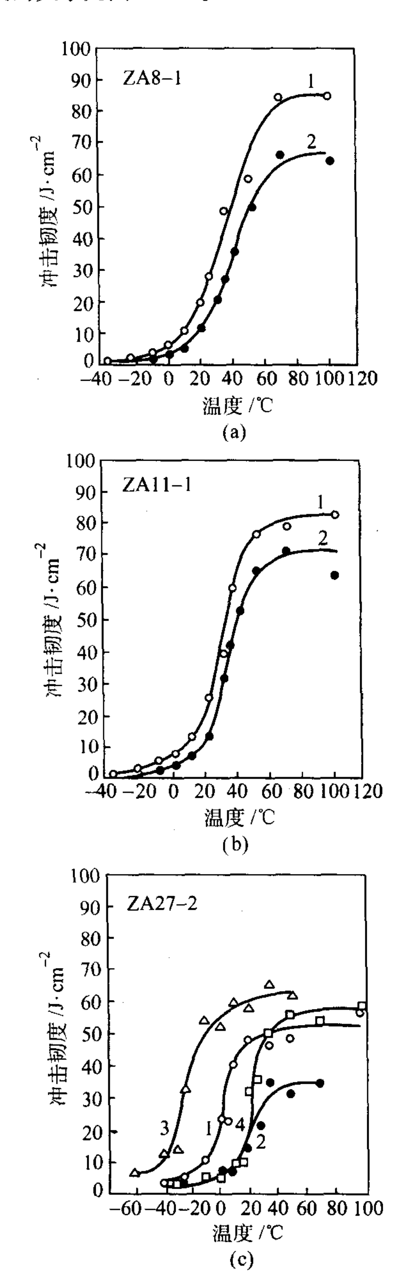


图6.1-38　砂型铸造锌合金的冲击韧度与温度的关系

1—铸态；2—时效状态；
3—均匀化处理；4—稳定化处理

铸造锌合金各种状态下的疲劳强度见表6.1-28和图6.1-39。

含高铝的重力铸造锌合金在很多水溶液和工业化学物质中有良好的耐蚀性，在酸性溶液中不耐蚀，见图6.1-40。金属型铸造的锌合金在盐雾腐蚀试验中，低铝锌合金失重较大。ZA8-1和ZA11-1合金相当，比低铝锌合金失重小。而ZA27-2合金仅次于压力铸造铝合金，见图6.1-41。

铸造锌合金的耐磨性好，可代替青铜制作耐磨零件。含铝量高的锌合金受人青睐。锌合金代替青铜作耐磨零件，除性能优良外，质量小、工艺简单、成本低。其性能比较见图6.1-42和图6.1-43。在低速、重载及润滑好的条件下，锌合金是青铜的良好的代用品。

另外，少量的Si、Mn、Ti对含高铝的锌合金耐磨性有改善。

3.3.2 重力铸造锌合金的特点及用途

1) ZA8-1（美国 ZA8）合金　这是过共晶型锌合金。金相照片见图 6.1-30。该合金有较高的抗拉强度和蠕变强度。铸造性能好，适于金属和石墨型铸造，很少用于砂型铸造。ZA8-1 合金也用于热室压力铸造，重力铸造的零件除蠕变强度外，抗拉强度低于压力铸造的零件。用 ZA8-1 合金铸造的零件接受电镀，而且电镀品质很好。

表 6.1-28　铸造锌合金的疲劳强度

（旋转弯曲疲劳试验，5×10^8 周）

合金代号	状　态	疲劳强度 σ_{-1}/MPa
ZA8-1	J、F	51.7
ZA11-1	S、F	103.4
ZA27-2	S、F	172.4
	S、热处理①	103.4

① 320℃，加热 3 h，炉冷。

ZA8-1 合金可用于生产管接头、阀、电气开关和变压器零件，工业用滑轮和带轮、客车和运输车辆零件，以及小五金零件等。

2) ZA11-1（美国 ZA12）合金　该合金含铝量比 ZA8-1 多，α 相多，强度、硬度和耐磨性都比 ZA8-1 高。冲击韧度、承载能力和阻尼效果也好。它的用途比 ZA8-1 合金广泛，既能用于砂型铸造，也能用于永久型铸造。

用 ZA11-1 合金可制造有润滑的轴承、轴套、蜗轮和耐磨零件，气压和液压配件，工业设备及农用机具零件，客车和运输车辆零件，管接头、阀、小五金等。

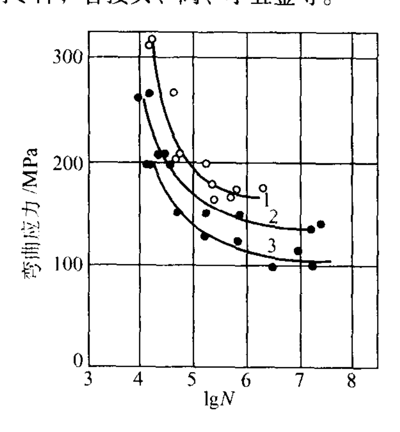


图 6.1-39　化学成分和热处理对锌合金疲劳曲线的影响

1—ZA27-2，360℃，加热 20 h后空冷；
2—ZA27-2，铸态；3—ZA11-1，铸态

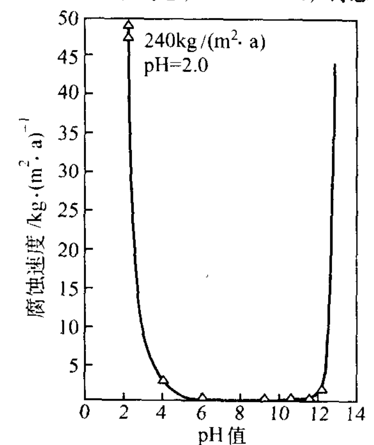


图 6.1-40　ZA27-2 合金室温下的腐蚀速度与水溶液 pH 值的关系（试样浸泡 4~15 d）

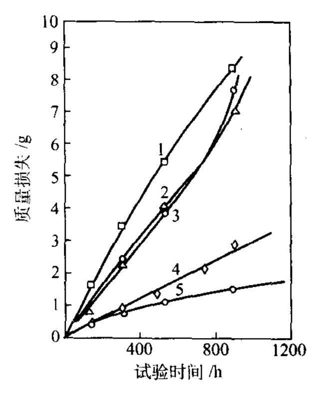


图 6.1-41　金属型铸造锌合金在盐雾腐蚀试验中的质量损失

1—ZZnAl4；2—ZA8-1；3—ZA11-1；
4—ZA27-2；5—压铸铝合金

3) ZA27-2（美国 ZA27）合金　这是目前铸造锌合金中含铝量最多的合金，是硬度、抗拉强度、伸长率和冲击韧度最高的锌合金，耐蚀性、耐磨性和阻尼效果均好。其腐蚀速度与水溶液 pH 值的关系见图 6.1-40。该合金适于砂型和金属型铸造。但是生产厚壁铸件时必须小心从事。因为铸件凝固时富铝相容易产生质量（重力）偏析，引起内壁收缩使铸件表面粗糙。使用冷铁（激冷）能减少这种弊病。该合金在凝固时收缩率大，在使用过程中尺寸不稳定（变化）。在 250℃保温 12 h 后随炉冷却，可增加零件使用过程中尺寸稳定性。在 320℃保温 3 h 后随炉冷却，可使零件的塑性和冲击韧度增加。该合金是锌合金中密度最小，可在 150℃工作的合金。二次蠕变极限较好。

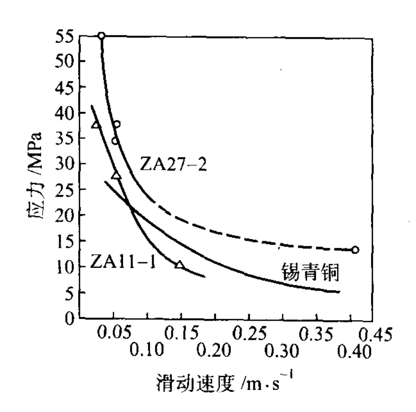


图 6.1-42　ZA11-1 和 ZA27-2 与锡青铜的 PV 特性比较

（锡青铜含 4.5%~6.0% Sn，8%~10% Pb）

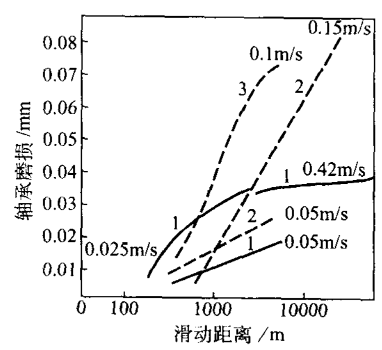


图 6.1-43　ZA11-1、ZA27-2 合金与锡青铜轴套磨损量比较

（轴承应力为 6.85 MPa）

1—ZA27-2；2—ZA11-1；3—锡青铜；
（锡青铜含 4.5%~6.0% Sn，8%~10% Pb）

用ZA27-2合金可以制造高强度薄壁零件，轴套、轴瓦、蜗轮等耐磨零件，气压和液压设备零件，工业设备和农业机具配件，客车和运输车辆零件等。

4　变形锌合金

4.1　锌及锌合金的塑性变形

锌的变形行为与它的密排六方晶体结构密切相关。

纯锌在室温下就能发生再结晶，即它的再结晶温度在室温或室温以下，因此，在室温下锌难以产生“加工硬化”。添加少量铜或镉形成的固溶体能提高再结晶温度。由此可见，不大可能通过冷轧方法生产轧制（硬状态）锌。通常的做法是控制最后一道次的压下量及变形温度；大多数情况下必须同时考虑成分、每道次加工率及加工温度。在特定温度下，锌中发生的各种变形方式由应变速率和晶粒大小决定的。降低应变速率和提高变形温度对锌变形有利。

多晶体锌的变形比单晶体锌的变形要复杂得多，因为除相邻晶粒的约束以及发生在晶界处的变形外，还有温度变化的影响。

铸造的锌块或锌棒（均称锌锭），基本上是由粗的柱状晶粒组成的，其取向使得基面平行于柱状晶轴，而与锌锭表面垂直。在这样的取向下，柱体高度通过压缩而压短必定是由基面弯曲开始的，而不是简单的滑移。这可以解释轧制锌时开始需要较大的轧制力的原因。

基面垂直于轧制方向排列的那些晶粒，因轧制时施加应力的速度较快，在轧制期间易受到解理应力的作用。因此轧制在高温下进行才有利于滑移变形，否则在铸锭表面上的将产生解理裂纹。

轧制期间，厚度减小和长度增加伴随着有些晶粒在轧制方向的滑移转动，当基面接近与轧制面平面时，垂直于基面的轧制力分量增大，直达到双晶（孪生）代替滑移的取向，双晶使晶粒局部点阵重新取向，从而又可以使滑移继续进行下去。热轧时一般看不到双晶，可能是双晶出现后立即通过再结晶形成了新的晶粒。

锌锭热轧温度在150~200℃较好。温度过高或过低会产生热轧裂纹。若锌的纯度高，热轧温度可适当降低。在热轧或温轧时，由于变形热效应作用，温度不但不降低反而会升高。因此，铸锭在热轧时常用分批循环轧制方法，即每个道次只轧数块，使其在各道次之间有个降温的机会。铸锭温度太高（这是不好的）应停止轧制，使其降温。工厂常利用铸锭余热（如水冷模铸造）直接热轧，热轧后在70~100℃时中轧，在50~70℃时精轧。热轧时轧辊温度应保持在80~120℃，中轧时轧辊温度应为60~80℃，精轧时轧辊温度应在45~60℃。润滑剂一般采用石蜡，也有用混合润滑油（如95%石蜡+5%硬脂；60%糠油+40%煤油等）。

近年来，连铸连轧方法在锌合金加工领域获得了很大的发展。

纯锌在挤压过程中于0.6 T_m（T_m 为熔点）以上发生动态再结晶，而蠕变时的动态再结晶温度在（0.7~0.8）T_m。扭转时，在（0.6~0.9）T_m 之间有显著的动态再结晶。

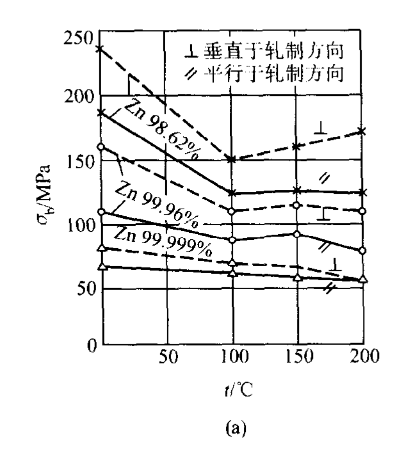
Zn-0.19Cu-0.5Cd-0.01Mg 锌合金在挤压时，在0.7 T_m 以上发生动态再结晶，说明合金元素对再结晶温度有影响。

细晶锌合金有超塑性特性，一般认为边界扩散和滑移是这种特性的控制因素。

锌中常见杂质有铅、铁、锡、镉等，有些杂质无害处，在某一方面可能还有好处，如铅对印刷用板就有好的影响，这是特例。在大多数情况下杂质如铁、锡、铋、锑、砷等，对锌的冷、热变形都不利，应极力避免。

各种纯度锌板的抗拉强度、伸长率与退火温度的关系见图6.1-44。

各种纯度锌板的时效和硬化的关系见图6.1-45。各种杂质对锌的硬度影响见图6.1-46。



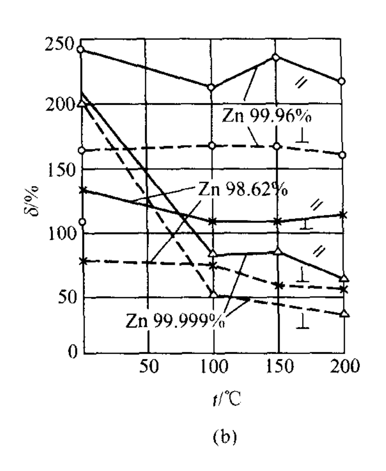


图6.1-44　各种纯度锌板的抗拉性能与退火温度的关系

4.2　变形锌合金的成分和性能

半个多世纪以来，人们对锌合金的注意力大多集中在铸造领域，除了超塑锌合金受到人们关注而外，对其他的变形锌合金注意的就少了。后来，发现钛对锌合金有良好影响，以及高强度抗蠕变 Zn-Cu-Ti 合金熔炼工艺、加工工艺的掌握，打破了锌合金不能作为结构材料使用的观念。

铜在锌中通过包晶反应生成 ε 相外，还通过包晶反应（$L+\varepsilon\rightarrow\eta$）生成固溶体 η 相（见图6.1-10）。铜在锌中的溶解度变化较大，在424℃为（最大）2.68%，400℃为2.4%，300℃为1.5%，200℃为0.8%，100℃为0.3%，20℃仅有0.2%。

Zn-Cu 合金虽然铜在锌中固溶度随温度变化较大，时效硬化倾向不显著。但是，合金由高温缓慢冷却时，将有 ε 相析出，伴随着明显的体积变化，使合金性能、尺寸也发生变化。Zn-Cu 合金体积变化的大小与晶粒分布状况有关，轧制、挤压、锻造和铸造的材料体积变化情况各不相同。

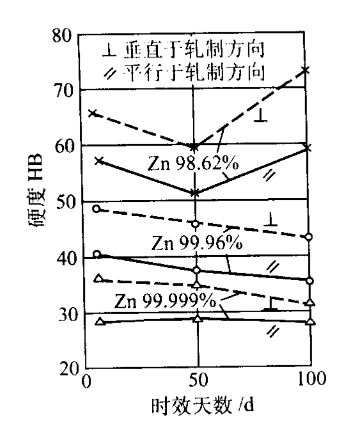


图 6.1-45 各种纯度锌板的硬度与时效时间的关系

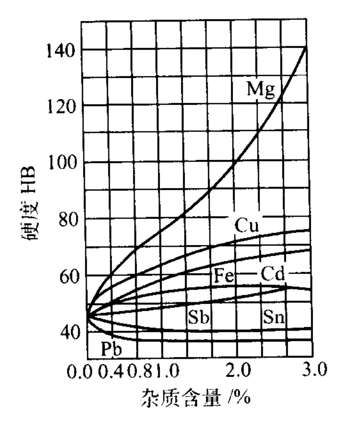


图 6.1-46 杂质对锌的硬度的影响
（原材料：精炼锌，硬型铸造）

变形锌合金中，铜能提高强度和塑性，钛与锌为共晶反应，共晶成分紧靠纯锌，钛与锌形成化合物 $TiZn_{15}$（见图 6.1-47）。因此，钛是以细小的 $TiZn_{15}$ 相分布，能细化晶粒，提高抗蠕变性能、合金的再结晶温度，应避免高温使用时的晶粒粗大化。由于钛和铜的共同作用，能明显改善其物理和力学性能。

铜对 Zn-0.1Ti 合金性能的影响见图 6.1-48。含铜量在 0%～1%范围内对硬度的提高幅度较大，大于 1%以后对轧制态合金的硬度提高幅度较小。但是，铜对抗拉强度和屈服强度的影响，在小于 1%Cu 时随着铜量的增加，其抗拉强度和屈服强度提高；在含 1%～3%Cu 时变化不大，若再提高含铜量，抗拉强度和屈服强度继续增加。而铜对 Zn-0.1Ti 合金伸长率的影响，在 2%Cu 时伸长率最大，高于或低于 2%Cu 时，伸长率都会下降。

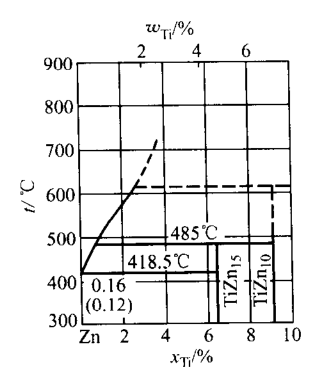


图 6.1-47 Zn-Ti 相图

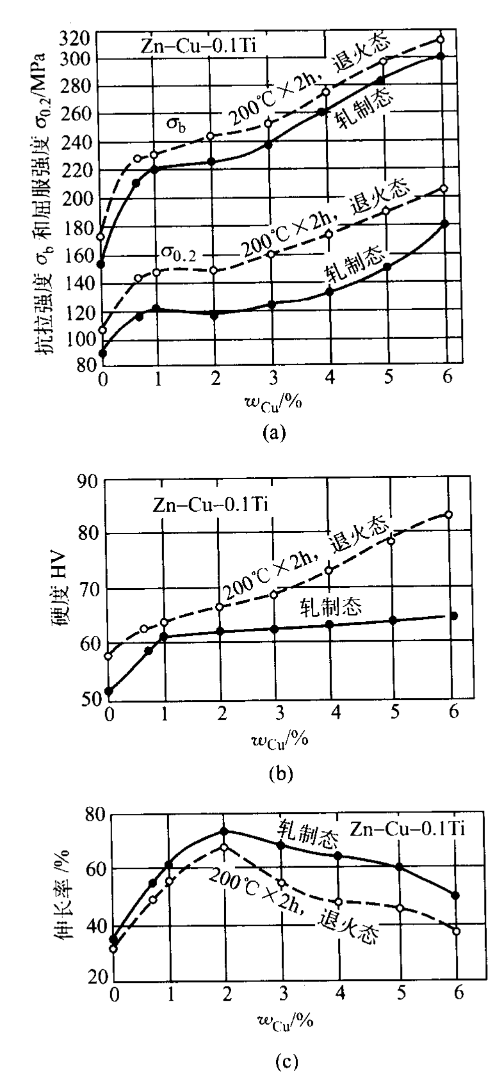


图 6.1-48 铜对 Zn-0.1Ti 合金性能的影响

钛能提高 Zn-Cu 合金的硬度（见图 6.1-49）。

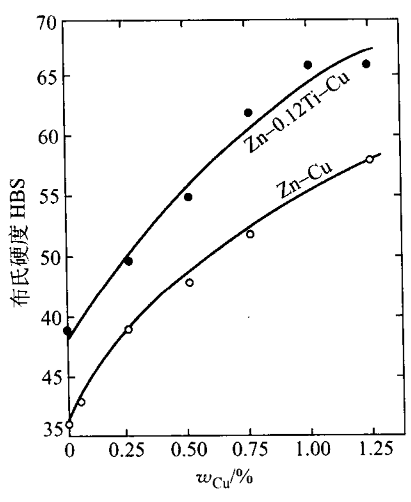


图 6.1-49 铸锭的硬度

目前各国使用的 Zn-Cu-Ti 合金化学成分一般含铜量为 0.5%～1.5%，含钛量 0.1%～0.5%，铸造状态金相组织

见图 6.1-50。该锌合金，铸态下白色基体为 Zn 的固溶体，枝晶间存在 $CuZn_3$ 化合物，合金中 Cu 提高强度和塑性，Ti 以细小的 $TiZn_{15}$ 相分布，使 Zn－Cu 合金硬度增大。Zn－Cu－Ti 合金主要用于生产板材，也可用于压铸件。杂质含量要求严格是锌合金中的特点。

Zn－Cu－Ti 合金与其他合金不同的是经过冷轧后明显变软，硬度和强度降低而塑性提高。冷轧加工率越大，软化程度越大。这是由于变形热导致再结晶，析出的 ε 相较多，使固溶铜含量减少所造成的。相反，热轧可以提高强度、硬度和抗蠕变性能。在 200～500℃轧制可获得最高强度。温度再高，强度虽然有降低，抗蠕变性能会提高。变形锌合金的性能受成分、变形温度和变形量等因素综合影响，选择加工工艺时应全面考虑（见图 6.1-51 和图 6.1-52）。

冷轧后退火会使合金硬度、强度有所提高，塑性相应地下降（见图 6.1-53）。Zn－Cu 二元合金，轧制后在 100℃以上退火，使硬度和强度显著下降，而含钛的 Zn－Cu 合金，在 200℃下退火 2 h，可表现出较高的硬度和强度。

Zn－Cu－0.1Ti 合金的抗拉强度和硬度与温度的关系见图 6.1-54。

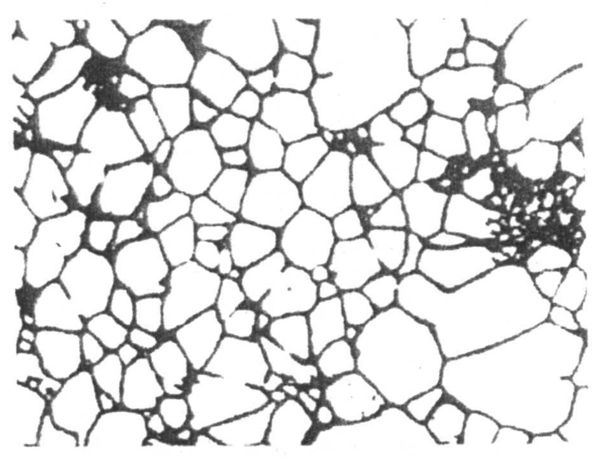


图 6.1-50　Zn－0.55Cu－0.12Ti 合金金相照片
浸蚀剂：氧化铬硫酸水溶液
状态：冷室压铸机压铸态
放大倍数：250×

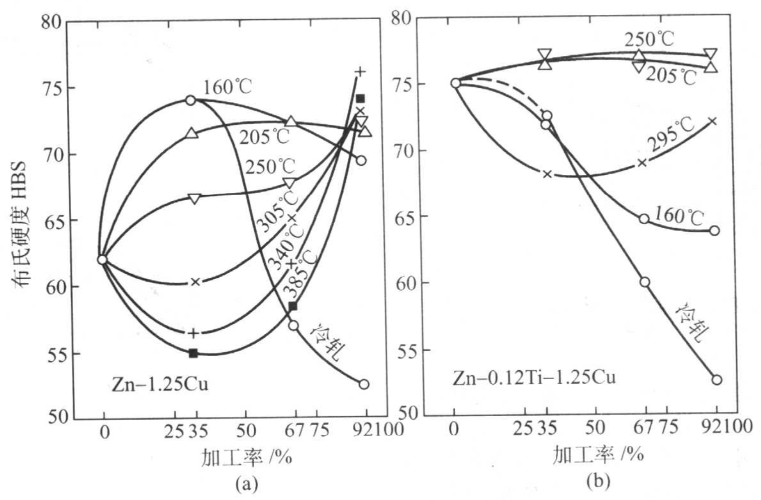


图 6.1-51　Zn－Cu 和 Zn－Cu－Ti 合金硬度与轧制温度、加工率的关系

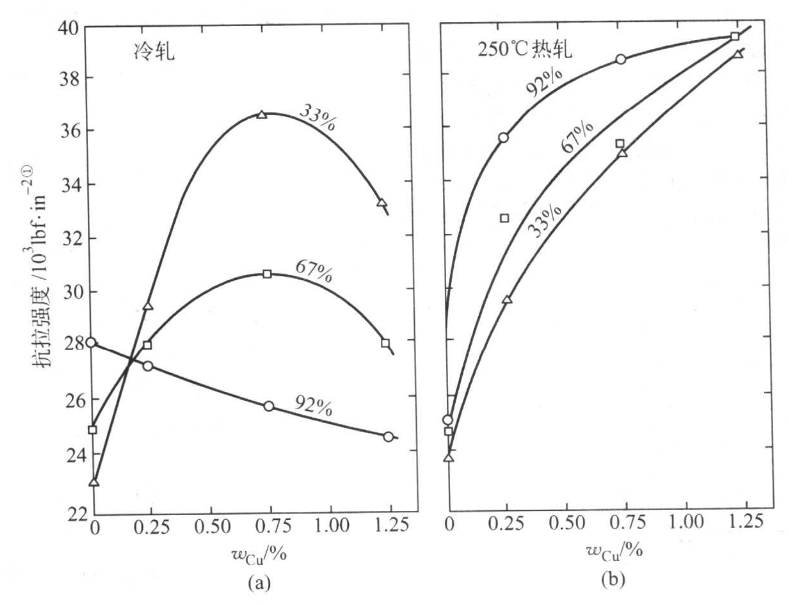
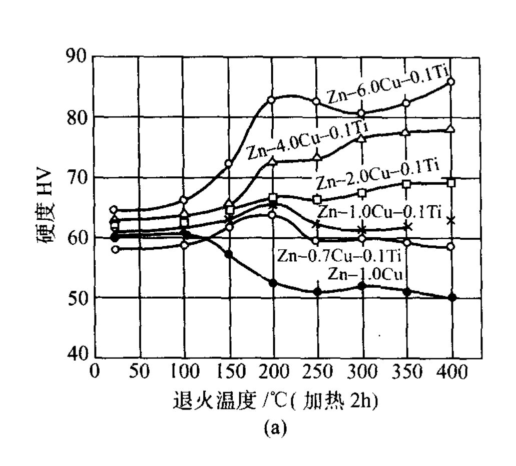


图 6.1-52　Zn－Cu－Ti 合金强度与加工率的关系（横向）

① $1\ bf/in^2 = 6\ 894.8\ Pa$



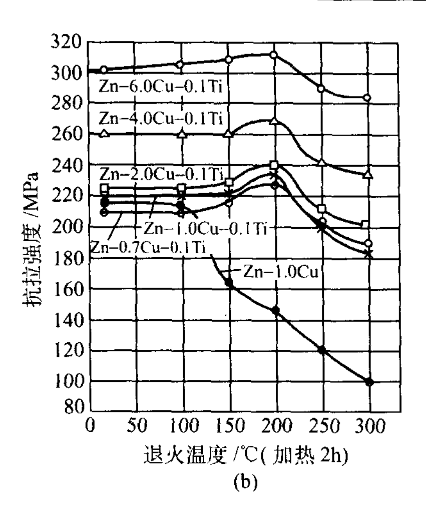
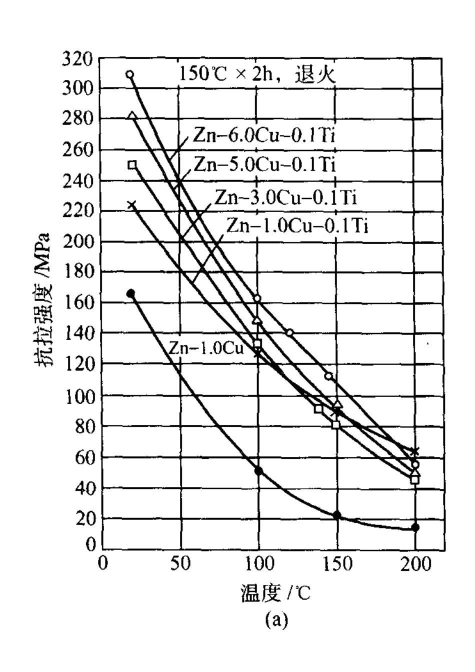


图 6.1-53　Zn-Cu-0.1Ti 合金在各种温度下退火 2 h 后的硬度（a）和强度（b）



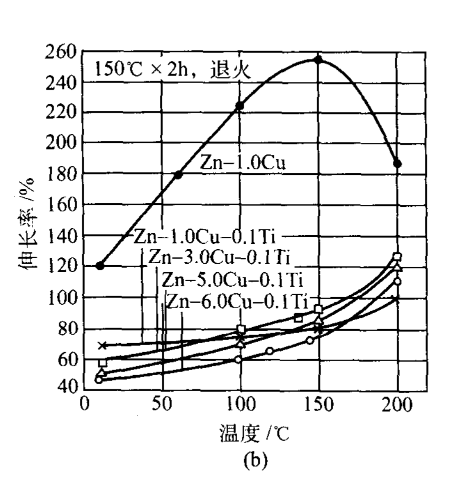


图 6.1-54　Zn-Cu-0.1Ti 合金高温拉伸的抗拉强度（a）和伸长率（b）
（试样：冷轧后 150℃退火 2 h）

4.3　变形锌合金的分类及用途

变形锌合金分轧制锌合金、挤压锌合金和拉拔锌合金。

4.3.1　轧制锌合金

锌合金板、带、箔都是用轧制方法生产的。锌合金的焊接性能好，容易二次成形加工，使其得到广泛的应用。典型轧制锌合金成分及用途见表 6.1-29。

表 6.1-29　轧制锌合金化学成分及用途

化学成分/%	用　途
纯锌	深拉五金，网眼板等
Zn-Cu 系如 Zn-0.8Cu	建筑结构，深拉五金及硬币等
Zn-Cu-Ti 系如 Zn-0.2Cu-0.1Ti	屋面，槽，下水管，建筑结构，深拉五金，号码牌及太阳能收集器等
Zn-Pb-Cd 系如 Zn-0.07Pb-0.05Cd	建筑结构，干电池壳，深拉五金，号码牌及电子元件等
Zn-Al-Cu-Mg 系如 Zn-22Al-0.5Cu-0.01Mg	成形构件，如打字机零件，计算机操作盘及外壳等
Zn-Al-Mg 系如 Zn-0.1Al-0.06Mg	光刻盘等

我国用作电池壳、阳极板、胶印及照相用锌板见表 6.1-30～表 6.1-34。

变形 Zn-Al 合金成分性能和用途见表 6.1-35 和表 6.1-36。变形 Zn-Cu 合金成分和用途见表 6.1-37。

美国新泽西锌公司开发的 NJZ 系列合金化学成分和力学性能见表 6.1-38。轧制锌及锌合金成分见表 6.1-39 和表 6.1-40。

轧制超塑锌合金成分见表 6.1-41。

表 6.1-30　电池锌饼（摘自 GB/T 3610—1997）

规格/mm				
直径		厚度		拱曲度≤
尺寸	允许偏差	尺寸	允许偏差	
31.90 30.90	+0.05 -0.10	3.65	+0.20 -0.10	0.35
24.00 22.60		3.65		0.30
19.20		3.30		0.30
13.20 10.60		5.50 3.80		0.25

化学成分（质量分数）/%

代号	Zn	Cd	Pb	Fe≤	Cu≤	Sn≤	其他金属元素总和≤
XB	余量	0.030～0.060	0.35～0.80	0.015	0.002	0.003	0.01

表 6.1-31　电池锌板（摘自 GB/T 1978—1988）

规格/mm					
厚度	允许偏差	宽度及其允许偏差		长度	长度允许偏差
		100～160	160～510		
0.25	+0.02 -0.01	+1	+3	750～1 200	+5
0.28 0.30 0.35	±0.02				
0.40 0.45 0.50 0.60	+0.002 -0.03				

化学成分（质量分数）

牌号	主要成分/%				杂质含量/%≤		
	Zn	Fe	Cd	Pb	Cu	Sn	总和①
XD1	余量	0.011	0.20～0.35	0.30～0.50	0.002	0.002	0.02
XD2	余量	0.008～0.015	0.03～0.06	0.35～0.80	0.002	0.003	0.025

① 表中未列入的金属元素包括在总和中。

表 6.1-32　锌阳极板（摘自 GB/T 2058—1989）

规格/mm								
厚度	允许偏差	宽度						理论质量/kg·m⁻²（相对密度7.15）
		150	200	300	400	450	500	
		最大长度						
5	±0.15	1 000	1 000	1 000	1 000	950	850	35.8
6	±0.20	900	900	900	900	800	750	42.9
8	±0.30	700	900	700	700	600	500	57.2
10	±0.35	500	600	600	500	450	400	71.5
12	±0.40	400	600	400	400	—	—	85.9

续表 6.1-32

名称	牌号	化学成分/%									
		Zn/%≤	杂质含量/%≤								
			Pb	Fe	Cd	Cu	Sn	Al	As	Sb	总和
一号锌	Zn-1	99.99	0.005	0.003	0.002	0.001	—	—	—	—	0.010
二号锌	Zn-2	99.95	0.020	0.010	0.02	0.001	—	—	—	—	0.050

表 6.1-33　胶印锌板（摘自 GB/T 3496—1983）

规格/mm									
厚度	允许偏差	宽度	宽度允许偏差	长度	长度允许偏差	同张板厚相差不超过	理论质量		备注
							kg/m²	kg/张	
0.55	±0.04	640	±3	680	±3	0.04	3.96	1.72	四开
		762		915				2.76	小对开
		765		975				2.95	大对开
		1 144		1 219		0.05		5.52	全开

化学成分（质量分数）

牌号	主要成分/%				杂质含量%/≤			
	Zn	Pb	Cd	Fe	Al	Cu	Sn	总和
XJ	余量	0.3～0.5	0.09～0.14	0.008～0.02	0.03	0.005	0.001	0.05

物理性能

牌号	抗拉强度 σ_b		伸长率 δ /%≥	硬度 HB≥	反复弯曲次数≥
	MPa	kgf·mm⁻²			
XJ	156.8	16	15	50	7

注：1. 表中理论质量是按相对密度 7.2 计算的。
2. 表中未列入的杂质包括在总和内。

表 6.1-34　照相制版用微晶锌板（摘自 YS/T 225—1994）

分类			
按工作表面加工方法	非磨光板	磨光板	抛光板
按非工作表面	保护涂层		无保护涂层

规格/mm						
厚度	允许偏差	同板差	宽度	宽度允许偏差	长度	长度允许偏差
0.8	±0.03	0.05	381～510	+3	600～1 200	+5
1.0 1.2	±0.04				550～1 200	
1.5 1.6	±0.05				600～1 200	

化学成分（质量分数）/%

牌号	主要成分/%			杂质含量/%≤					
	Zn	Al	Mg	Pb	Fe	Cd	Cu	Sn	总和
X12	余量	0.02～0.01	0.05～0.15	0.005	0.006	0.005	0.001	0.001	0.013

注：经双方协议，可供应其他规格及尺寸允许偏差的板材。

表 6.1-35 我国变形 Zn-Al 合金的成分

合金代号	主要成分/%				用途
	Al	Cu	Mg	Zn	
ZnAl15	14.0~16.0	—	0.02~0.04	余量	用于挤压，可作黄铜代用品
ZnAl10-5	9.0~11.0	4.5~5.5	—	余量	
ZnAl10-1	9.0~11.0	0.6~1.0	0.02~0.05	余量	
ZnAl4-1	3.7~4.3	0.6~1.0	0.02~0.05	余量	用于轧制和挤压，可作 H59 黄铜的代用品
ZnAl0.2-4	0.20~0.25	3.5~4.5	—	余量	用于轧制和挤压，供制造尺寸要求稳定的零件

表 6.1-36 我国变形锌合金的力学性能和物理性能

性能	产品代号					
	ZnCu1	ZnAl15	ZnAl10-5	ZnAl10-1	ZnAl4-1	ZnAl0.2-4
凝固温度/℃	422~430	450~380	395~378	410~380	385~380	470~424
密度/$g\cdot cm^{-3}$	7.18	5.7	6.3	6.2	6.7	7.25
线胀系数（20~100℃）/$10^{-6}K^{-1}$	34.8	27~28	27	27~28	27.4	—
弹性模量 E/MPa	—	113 000	—	130 000	130 000	126 000
抗拉强度 σ_b/MPa	200~300	250~400	350~450	400~460	370~440	300~360
伸长率 δ/%	20~30	10~40	12~18	8~12	8~12	20~30
面缩率 ψ/%	70~80	40~50	—	45~60	25~60	60~70
冲击韧度 a_K/$J\cdot cm^{-2}$	15~20	13~16	5~10	18~21	18~22	5~7
硬度 HB	45~75	60~100	90~110	90~110	90~105	75~90

表 6.1-37 我国变形 Zn-Cu 合金的成分及其用途

合金代号	主要成分/%				用途
	Al	Cu	Mg	Zn	
ZnCu1.5	—	1.2~1.7	—	余量	用于轧制和挤压，可作 H68、H70 等黄铜的代用品，制造拉链、千层锁、日用五金等制品
ZnCu1.2	—	1.0~1.5	—	余量	
ZnCu1	—	0.8~1.2	—	余量	
ZnCu0.3	—	0.2~0.4	—	余量	

表 6.1-38 NJZ 合金的成分及力学性能

合金牌号	合金成分（质量分数）/%				力学性能						
					σ_b/MPa		δ/%		硬度（HR15T）		疲劳极限/MPa
	Pb	Fe	Cd	Cu	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	
1	≤0.10	≤0.012	≤0.007	≤0.001	113~148	139~181	42~70	33~56	45~56	45~61	17.2
5	0.26~0.30	≤0.006	0.035~0.050	≤0.002	139~163	174~208	42~65	30~51	47~58	55~75	26.2
10	0.20~0.35	≤0.015	0.12~0.20	≤0.005	139~163	174~220	42~65	30~51	47~58	55~75	26.2
15①	≤0.10	≤0.012	≤0.04	0.65~0.85	167~217	214~265	26~39	12~29	65~76	71~82	46.9
25②	≤0.30	≤0.012	≤0.007	0.50~0.70	166~209	218~300	28~54	16~47	60~76	69~80	—
30	0.15~0.25	≤0.016	0.06~0.10	≤0.005	134~156	172~203	40~62	29~54	40~60	56~62	26.2
35	0.05~0.09	≤0.008	0.14~0.18	≤0.005	146~167	179~201	45~59	28~47	46~62	60~69	26.2
45	≤0.10	≤0.012	≤0.007	0.65~0.85	132~214	169~280	24~62	17~47	50~70	62~71	42.1
49	≤0.10	≤0.012	0.02~0.08	0.12~0.19	132~214	169~280	24~62	17~47	52~69	62~71	42.1
50	0.04~0.08	≤0.012	0.05~0.12	≤0.005	128~189	152~245	25~56	17~44	44~61	55~67	26.2
55	0.25~0.40	≤0.030	0.25~0.35	≤0.005	143~176	183~222	29~60	21~46	51~74	57~64	28.3
60	≤0.003	≤0.001 4	≤0.003	—	134~159	145~186	50~65	40~50	20~40	40~50	17.2

① 15 另外还含 0.006%~0.016% Mg;
② 25 还含 0.08%~0.12% Ti。

表 6.1-39 轧制锌及锌合金的典型成分（摘自 ASTM B 69）

合金	UNS 牌号	合金成分（质量分数）/%					
		Pb	Fe	Cd	Cu	Mg	Zn
未合金化锌	Z21210	<0.05	<0.01	<0.005	<0.001	—	余量
Zn-Pb-Cd	Z21310	0.05~0.12	<0.012	<0.005	<0.001	—	余量
Zn-Pb-Cd	Z21540	0.30~0.65	<0.020	0.2~0.35	<0.005	—	余量
Zn-Cu	Z44330	0.05~0.12	<0.012	<0.005	0.65~1.25	—	余量
Zn-Cu	Z45330	0.05~0.12	<0.015	<0.005	0.75~1.25	0.007~0.02	余量

表 6.1-40 锌合金板、带的典型成分（摘自 QQ-Z-100A）

合金	合金成分（质量分数）/%							
	Cu	Pb	Fe	Cr	Mn	Cd	Ti	Zn
Zn-Cu	0.2~1.2	<0.25	<0.015	<0.02	<0.01	<0.07	—	余量
Zn-Cu-Ti	0.5~0.8	<0.20	<0.015	<0.02	<0.01	<0.01	0.08~0.16	余量

表 6.1-41 轧制超塑锌合金的典型成分

合金	合金成分（质量分数）/%			
	Al	Cu	Mg	Zn
Zn-Al	20~24	—	—	余量
Zn-Al	20~24	0.4~0.6	—	余量
Zn-Al	20~24	0.4~0.6	0.005~0.03	余量

4.3.2 挤压锌合金

锌在低速形变时没有一个很确定的弹性模量，但在快速变形条件下锌却有一个高而明显的弹性模量。因此，挤压锌及锌合金所需的压力高于大多数有色金属的挤压力。随着温度的提高，挤压变得容易进行，因此通常将挤压用坯料加热到尚不致引起热脆性的最高温度。这个温度可由250℃提高到300℃，这个温度取决于化学成分。锌及其合金挤压速度比黄铜的低得多，这是因为随着挤压速度的提高，锌挤压品的温度会迅速提高到热脆温度，由此可引起开裂和起皮。

寻找挤压锌合金，一直受到美、英和德国重视。研究Zn-Al-Cu系加少量镁、锂或其他元素的合金的挤压制品性能，肯定加镁是有好处的，但不能多。加锂和加镁作用相似。加少量锰或镍可以改善强度，韧性会受到损失。这种合金性能与成品有关，抗拉强度为220~480 MPa，伸长率为10%~85%，带切口冲击试样的冲击韧度低于7J。除冲击韧度略低外，其他力学性能是令人满意的。室温和95℃时效对这些合金的尺寸稳定性和力学性能的影响也引起了重视。

只要采取相当简单的预防措施和限制，这些合金性能可与H60黄铜相比，生产成本也不会比H60黄铜的高。特别是出现铜资源紧缺的时候，这些合金能为黄铜提供有效的代用品。

寻找黄铜代用品，很早就对变形锌合金给予了足够的重视。早期有两种锌合金，即Zn-4Al-0.5Cu-0.03Mg和Zn-10Al-2Cu-0.03Mg作为切削加工黄铜代用品。后一种合金容易挤压成形，并具有良好的热加工性能和适当的强度，获得广泛采用。Zn-（3.7%~4.0%）Cu-（0.2%~0.3%）Mg-（0.05%~0.20%）Al-（0.25%~0.40%）Bi合金应用于高速切削，如果将Bi含量降低一半，换成加入0.6%~0.8%Pb，0.02%~0.50%Ti，可进一步改善高速切削性能。这类合金的缺点是力学性能和尺寸稳定性差，挤压成形比较困难。挤压合金典型成分见表6.1-42。Zn-Mg，Zn-Cu-Mn，Zn-Al-Cu-Mn和Zn-Al-Mg-Mn等挤压锌合金在研制开发中。1996年宋德成等对ZA27-2合金进行的挤压试验表明，挤压加工能大幅度提高合金的综合性能，提高了合金制品使用寿命。挤压锌合金ZA27-2可成为ZQSn—6-6-3锡青铜的代用材料。

此外，在表6.1-35和表6.1-37中的合金也可作挤压合金。

表 6.1-42 挤压锌合金典型成分

合金	合金成分（质量分数）/%					
	Al	Mg	Cu	Ti	Mn	Zn
Zn-Al	11.0	0.02	0.75	—	—	余量
Zn-Al	14.5	0.02	0.70	—	—	余量
Zn-Cu-Ti	—	—	1.0	0.1	—	余量
Zn-Cu-Ti	—	—	1.0	0.1	1.0	余量

4.3.3 拉拔线、棒锌合金

轧制或挤压的锌及锌合金棒材可以拉拔成线材，其工艺与其他有色金属十分相似。拉拔线、棒产品主要用作热喷镀金属线、焊料、焊丝以及制钉、螺钉螺母、网线等。一些常用的拉拔锌合金化学成分见表6.1-43。含铝量较高的，如10%~20%Al的Zn-Al合金也有用来生产线材、棒材的。

表 6.1-43 拉拔锌合金的化学成分

合金	合金成分（质量分数）/%						
	Al	Cu	Ti	Fe	Cd	Pb	Zn
控制成分的纯锌	—	—	—	<0.002 5	<0.002 5	<0.003	余量
控制成分的纯锌	—	—	—	<0.013	<0.007	<0.004	余量
Zn-Cu-Ti	—	<0.7	<0.16	<0.005	<0.005	<0.006	余量
Zn-Al	<0.3	<0.005	—	<0.003	<0.06	<0.006	余量
Zn-Al	1.6~2.4	<0.005	—	<0.005	<0.005	<0.005	余量

5　镀层用锌合金

锌作为钢铁的防腐蚀镀层是最好的，而且用量最大，随着建筑业和汽车工业对镀锌钢板的需求，将会进一步的增加。很少用纯锌作镀层，已基本上全部是锌合金镀层，一般习惯，仍称镀锌。

钢铁产品镀锌分为，热镀锌、电镀锌、热喷涂、渗锌和机械镀锌。

5.1　热镀锌合金

热镀锌合金锭的牌号及化学成分见表 6.1-44。

表 6.1-44　热镀锌合金锭牌号及化学成分（质量分数）（摘自 YS/T 310—1995）

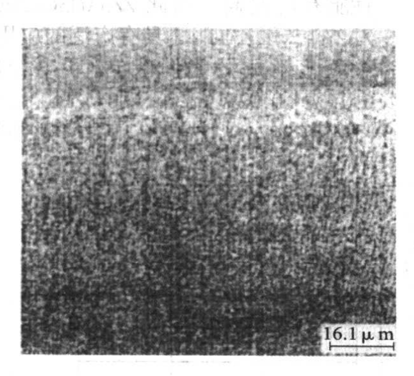
牌号	代号	主要成分/%				杂质含量/% ≤								
		Zn	Al	Pb	La + Ce	Fe	Cd	Sn	Cu	Pb	Si	其他杂质元素 单个	其他杂质元素 总和	杂质总和
RZnAl0.36	R36	余量	0.34 ~ 0.38	0.06 ~ 0.09	—	0.006	0.01	0.01	0.01	—	—	—	—	0.04
RZnAl0.42	R42	余量	0.40 ~ 0.44	0.06 ~ 0.09	—	0.006	0.01	0.01	0.01	—	—	—	—	0.04
RZnAl5RE	RE5	余量	4.7 ~ 6.2	—	0.03 ~ 0.10	0.075	0.005	0.002	—	0.005	0.015	0.02	0.04	—

热镀锌合金用于钢带、钢管、钢铁结构及钢铁部（零）件的镀锌。

钢带镀层一般小于 25 μm，钢带表面上镀锌层约为 175 g/m²。这种镀层黏着力和成形性能良好，加上有好的焊接性能，受到汽车制造业的青睐。建筑业，家具家电业等喜欢它不用先喷漆，用量也大。

钢铁部（零）件及钢管、热交换器等用热镀锌合金层厚度为 85 ~ 100 μm，为 500 ~ 600 g/m²。热浸时间长，镀层就厚；热浸时间短，镀层就薄。这种技术的传统市场是电力工业、微波传送塔、公路交通用品（护栏、标牌、照明钢架等）、钢管、热交换器等等。

Zn - Fe 状态图指出，从纯锌向 Fe 方向逐次形成下列各相：铁在锌中的固溶体 η，实际是纯锌层，ζ 相，δ_1 相以及 Γ 相。在正常镀锌温度（460℃），镀锌钢板表面层显微组织见图 6.1-55。



合金相	维氏硬度
η	70
ζ	179
δ_1	
δ_{1K}	244
Γ	
Fe	159

图 6.1-55　热浸镀锌层显微组织各层的相和维氏硬度

Zn - 1Pb 合金是广泛应用的镀层合金，铅不溶于固态锌，因此在合金凝固时，液态铅粒被固态锌包围。当温度降到 318℃以下时铅粒凝固。当铅含量超过 0.1%，凝固层产生特有亮晶晶金属片组织，通常称为锌花，有这种表面镀层的钢铁零件很受欢迎。

铅能减小镀锌合金液体的表面强力，改善钢铁零件的润湿性，还有保护镀锅延长镀锅寿命的作用。为了改善镀层亮度，锌中还加少量铝（0.007% 以下）。有时还加少量（0.001% ~ 0.01%）其他元素如 Sn、Cd 和 Sb 等。

Zn - Al 系所有锌合金均可用于热镀锌。0.15% ~ 0.25% Al 的低铝合金，不加任何其他元素，可作汽车工业用无锌花镀锌钢板。加 0.1% Pb 后，这种锌合金镀层有受欢迎的锌花。铝的作用很重要，少量时能抑制镀层中金属间化合物生长，保护镀层具有良好的塑性。含铝量在 1%以下时，对钢铁的润湿性有好处。

近些年有新的热镀锌上市。如含 5% Al 及少量稀土元素的 Galfan 合金，这种合金镀层塑性好。含 55% Al 的镀层合金具有优良的耐蚀性，建筑业应用前景广泛。

5.2　电镀锌合金

带材电镀锌对汽车业越来越重要。现在，锌镍、锌铁，以及纯锌镀层的带材都可以生产出来。在无氰电镀，光亮电镀及镀层处理等方面均取得了很大进步。这样的镀层比热浸镀均匀、光滑，而且镀层薄，其防护性、附着力强，易成形、焊接和上漆。

5.3　热喷涂（镀）

这是用高温热喷涂技术将锌或锌合金熔体喷在钢铁表面上，形成锌或锌合金保护层，适用于大型钢铁结构，特别是旧的钢铁结构，如桥梁、建筑物等，重新装饰及防护。

应注意，使用纯锌时，纯度要高，或使用 Zn - 15Al 合金。如果用粉状或丝状的锌合金，用火焰或电弧使之雾化，再用高速喷枪喷涂。

5.4　渗锌（镀）

在热状态下使锌原子渗入被镀钢铁零件表面上，形成锌合金层。镀层牢固、均匀、光滑，耗锌少，节省能源，镀层防护能力强。

5.5　机械镀锌

这是把钢铁零件放进滚筒里，将有机酸及相应的有机盐组成的缓冲溶液，再加入表面活性剂、锌或锌合金粉及亚锡

盐等进行滚动或振动，活性离子引导锌的沉积，形成镀层。这种方法在金属制品、高强度紧固件及避免热作用的零件方面有很好的应用前景。

6　其他锌合金

6.1　减振锌合金

这是一种很有发展前途的新型结构材料。国外称之为阻尼锌合金，它可以降低工业噪声和减轻机械振动。减振锌合金的成分范围为：13%～62% Al、0.05%～3% Cu、0%～0.02%Mg、0.5%～7%Si，其余为 Zn。铝是锌合金中的主要添加元素，其含量对合金的减振性能影响很大（图 6.1-56）。铝的质量分数从 13%上升到 20%时，锌合金的减振性能增加近四倍。继续增加含铝量，锌合金的减振性能下降，在合金中加入铜、镁、硅均降低合金的减振能力。铜、镁对铸态合金内摩擦值影响很小，但明显降低热处理后的内摩擦值。

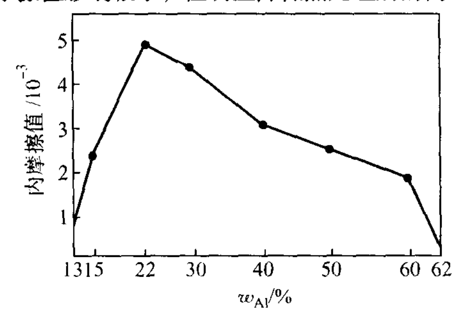


图 6.1-56　铝含量对 Zn－Al 合金减振能力的影响

温度对锌合金减振能力影响较大，在 200℃时达到最佳值，然后随温度的上升而减小。

锌合金经固溶化处理（加热至 360℃保温 1～2 h，紧接着水淬）后，减振能力大幅度提高。此外，将铸型预热到 150～300℃，然后浇注，凝固后取出直接水淬也能大幅度提高合金的减振能力。上述措施主要是通过消除共晶组织，形成共析组织而提高内摩擦值。此外，添加少量稀土元素，硼或锆均能提高 Zn－Al 合金的减振性能和强度。

6.2　耐磨锌合金

作为耐磨材料是锌基合金的主要用途之一，在很多领域取代了铜合金，在低速（小于 27.44 m/min）大压力(6.89 MPa)条件下，锌基合金的耐磨性能明显优于锡青铜，其摩擦因数也比青铜的小得多，并且有良好的跑合性能，优异的嵌入性和抗咬合性。但也存在明显的不足，即允许的工作温度不高（ZA27－2 为 120～150℃，ZA11－1 为 90～120℃），故主要用于低速重载工况。锌合金的磨损情况与其载荷及运转速度有关，在 22N 载荷下不同含 Al 量的 Zn－Al 二元合金的磨损量随摩擦速度的变化见图 6.1-57，由图可知，含 Al 量提高，磨损量减小。低速（如 0.5 m/s）的磨损量达到最小值。Si 的影响见图 6.1-58。在一定载荷下提高滑动速度，即增大 PV 值，则单位时间产生的摩擦热量增大，工作表面的温度升高，从而使锌铝合金的强度、硬度降低，耐磨性下降。

进一步提高铝锌合金的 Al 含量时，锌合金的常温抗拉强度及伸长率虽有所降低，但常温硬度、高温硬度以及耐磨性能有所提高，因此 ZZnAl43Cu2Mg 合金作为耐磨材料比 ZA27－2 和 ZA11－1 具有广泛的应用前景。ZZnAl43Cu2Mg 合金的化学成分为：42.5%～43.6% Al，2.0%～2.5% Cu，0.01%～0.02%Mg，＜0.04%Pb，＜0.003%Cd，＜0.03%Sn，＜0.010%Fe，余为 Zn。其力学性能见表 6.1-45。

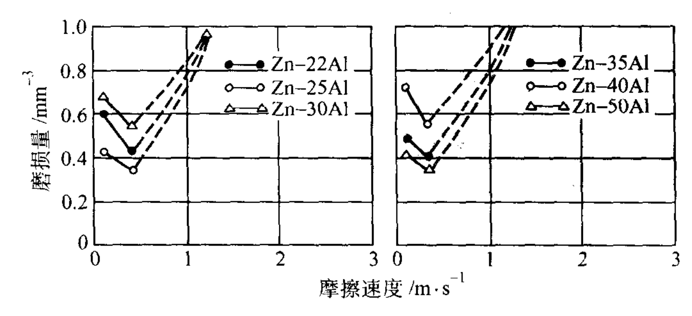


图 6.1-57　铸态 Zn－Al 合金的磨损量与铝含量的关系

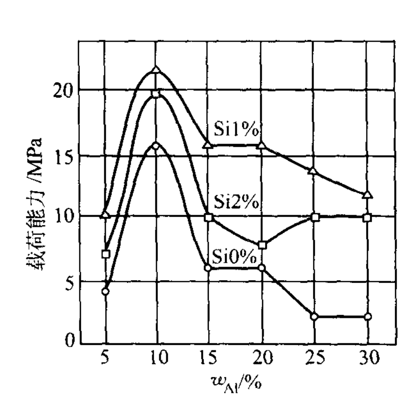


图 6.1-58　铝和硅含量对锌合金最大载荷能力的影响

采用 Si、Mn 合金化也可改善 ZZnAl43Cu2Mg 的高温性能和耐磨性。挤压铸造可消除晶间缩松，获得致密铸件，合金的力学性能和耐磨性能提高。

表 6.1-45　ZZnAl43Cu2Mg 合金的力学性能

性能指标 \ 工艺方法	J、S	Y、S
抗拉强度/MPa	260.5	414.5
伸长率 δ_5/%	1.0	2.0
硬度 HB	114	117

6.3　离心铸造锌合金

最近开发出的环保型锌合金，可用来制造首饰及精美工艺品，如戒指、耳饰、胸针、钮扣、领带夹、皮带扣、工艺摆设、各种徽志像章、微型塑像、玩具、文具以及小五金，等等。

其化学成分见表 6.1-46。物理性质见表 6.1-47。

表 6.1-46 离心铸造锌合金成分

化学成分（质量分数）/%							
Al	Cu	Mg	Pb	Fe	Cd	Sn	Zn
3.8~4.2	2.5~3.5	0.4~0.6	<0.003	<0.020	<0.003	<0.001	余量

表 6.1-47 离心铸造锌合金物理性质

密度/g·cm⁻³	凝固温度/℃	收缩率/%	线胀系数/10⁻⁶K⁻¹
6.6	370~380	0.6~1.0	28

离心铸造锌合金流动性好，适于制造各类复杂或异形的饰品及薄壁工件等。制品致密，尺寸精确，表面精美，后处理瑕疵少。熔点低，适于硅胶模小批量生产，制作交货快，成本低。

6.4 成形模具锌合金

工业上有时用锌合金制造金属板材成形模具和塑料模具，制造快、成本低是一大特点。要求尺寸准确的模具可采用喷射铸造法。成形模具锌合金成分见表 6.1-48。

表 6.1-48 成形模具锌合金化学成分（质量分数） %

编号	Al	Cu	Mg	Cd	Fe	Pb	Sn	Zn
A	3.5~4.5	2.3~3.5	0.02~0.10	<0.005	<0.100	<0.007	<0.005	余量
B	3.9~4.3	2.5~2.9	0.02~0.05	<0.003	<0.075	<0.003	<0.001	余量

6.5 凝壳铸造锌合金

空心铸件广泛用于像台灯座、吊灯零件及艺术品等。由于熔点低、适用于各种铸型、操作方便，很受欢迎。

将熔化了的锌合金（见表 6.1-49）浇注到模型腔内，当充满铸型后，将熔融合金倒出来，铸型壁上凝固一层合金，即所需的薄壳铸件。壳的厚度取决于浇注温度、凝固时间、铸型材料、铸型温度及操作技术等因素。

表 6.1-49 凝壳铸造锌合金化学成分（质量分数） %

编号	Al	Cu	Cd	Fe	Pb	Sn	Zn
A	4.50~5.00	0.2~0.3	<0.005	<0.100	<0.007	<0.005	余量
B	5.25~5.75	<0.1	<0.005	<0.100	<0.007	<0.005	余量

7 锌合金熔炼与浇注

7.1 熔炼与浇注知识基础

7.1.1 氧化与挥发

合金中各种元素的氧化倾向直接影响合金化的准确性和合金的纯洁性，而氧化和挥发难易影响配料的计算，因此对各种合金元素的氧化与挥发基本特性必须了解。几种常用金属氧化物性质见表 6.1-50。

在熔炼合金时，氧化物成为渣，漂浮在熔体表面上或混在熔体中或沉在熔体下部，如不清除，轻者影响铸锭或铸件品质，夹杂孔洞多，力学性能低，表面粗糙；重者产品报废。因此，在合金浇注之前要进行净化（或叫精炼）处理。一般，除渣与除气同时进行（见 7.1.2 节除气部分）。

表 6.1-50 金属氧化物性质

氧化物名称	分子式	相对分子质量	密度/g·cm⁻³	熔点/℃	沸点/℃	生成热	
						/kJ·mol⁻¹	1mol 氧原子参加反应时/kJ
氧化镁	MgO	40.30	3.65	2 800	3 600	610.44	610.44
三氧化二铝	Al_2O_3	101.96	4.00	2 000	2 200	1 687.28	562.41
二氧化钛	TiO_2	79.90	4.26	1 825	—	912.72	456.36
氧化锰	MnO	70.94	5.18	1 650	—	389.79	389.79
二氧化锰	MnO_2	86.94	5.03	>320（分解）	—	525.02	260.00
氧化亚铁	FeO	75.85	5.7	1 420	—	270.05	270.05
四氧化三铁	Fe_3O_4	231.54	5.2	1 538（分解）	—	1 115.78	278.84
三氧化二铁	Fe_2O_3	159.70	5.12	1 560	—	817.26	272.39
氧化亚铜	Cu_2O	143.09	6	1 235	—	167.05	167.05
氧化铜	CuO	79.55	6.4	1 026	—	146.08	146.08
氧化锌	ZnO	81.38	5.6	1 800	—	349.01	349.01
氧化镉	CdO	128.40	7.5	1 420	1 380（升华）	260.42	260.42
氧化锡	SnO	134.69	6.95	1 040	—	284.28	284.28
二氧化锡	SnO_2	150.69	7.0	1 627	2 250	568.57	284.28
三氧化二锑	Sb_2O_3	291.50	5.67	656	1 570	700.87	232.62
四氧化二锑	Sb_2O_4	307.50	6.2	1 060（分解）	—	817.64	204.40
五氧化二锑	Sb_2O_5	323.50	3.78	450（分解）	—	960.28	192.05
二氧化铈	CeO_2	172.12	7.2	1 950	—	977.20	488.60
氧化亚铅	Pb_2O	430.40	8.34	—	—	214.78	214.78
氧化铅	PbO	223.20	9.53	888	—	220.64	220.64

7.1.2 金属的吸气与除气

在一定的温度和压力条件下，气体在金属中有一定的溶解度，而且温度越高溶解度越大。在金属熔化（或凝固）时气体溶解度有一突变，见图6.1-59。

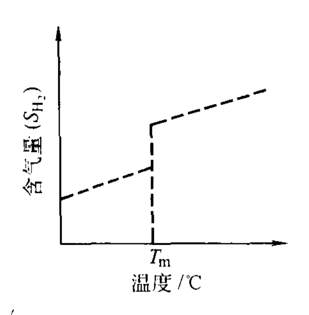


图6.1-59 气体在金属中溶解的示意图

表6.1-51 含氢量对ZA11-5合金性能的影响

含氢量 /cm³·(100 g)⁻¹	密度 /g·cm⁻³	孔隙率 /%	抗拉强度 /MPa	伸长率 /%	硬度 HB
0.14	6.28	0.27	372	1.50	131
0.20	6.27	0.42	370	1.20	126
0.24	6.25	0.50	343	0.90	122
0.34	6.23	0.92	319	0.60	119
0.37	6.21	1.30	308	0.30	118

锌合金的力学性能与含气量有关，合金中的气体基本是氢，最有害的也是氢。ZA11-5合金含氢量对力学性能的影响见表6.1-51。合金中含气量越多，力学性能及致密度越差。因此，必须将气体尽量排除干净。

希望金属与合金中含气量低，首先是防止气体侵入，气体来源有水汽、油污随炉料带入，因此要做好熔前准备，如烘炉、烤料、工具上涂料、熔剂干燥及熔炼时不过热和减少搅动等。其次是设法除气，通常是净化或精炼。一般是用气泡浮游除气法，即加入惰性气体或含氯化合物（NH_4Cl、$ZnCl_2$或C_2Cl_6等）或能分解成不溶于合金的气体（Cl_2、CO、CO_2、N_2等）的熔剂进行精炼（净化）处理。第三是快速凝固，使金属合金中的气体来不及析出，减少其危害性。

很多书中说，锌合金不需要精炼（净化）处理。应该这么说，从市场上购买的合格锌合金锭重熔后，可以不进行精炼处理。但是，锌合金液体温度要保持在415~430℃，而且要稳定，包括压铸机前熔炉的补料。最好不要将水口料及废料直接放回熔炉重熔，减少搅拌和过于频繁地扒（撇）渣。有锌渣时，应精炼处理后扒渣。

另外，生产锌合金锭或压铸厂自己熔制锌合金时，精炼处理是不可少的，气体和夹杂清除越干净越好。为减少烧损，熔炼时覆盖剂可以使用木炭。净化处理时可使用市场上的锌合金精炼剂或氯化铵（或氯化锌或六氯乙烷）。

也有采用陶瓷过滤器过滤合金液，这样能获得更好的净化效果。过滤对ZA27-2合金伸长率和冲击韧度的影响见图6.1-60。

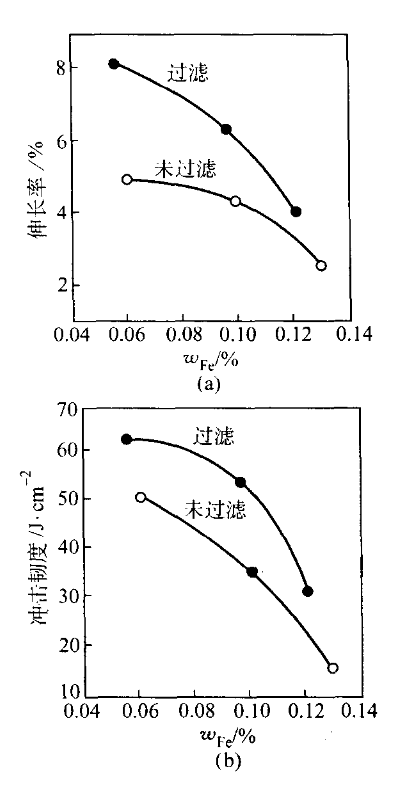


图6.1-60 过滤对ZA27-2合金伸长率和冲击韧度的影响

7.1.3 变质处理

锌合金特别是含铝较多的锌合金也有采用变质处理的，细化固溶体晶粒，改善合金力学性能。固溶体晶粒尺寸对ZA27-2合金伸长率影响见图6.1-61。

不同变质剂对金属型铸造的ZA27-2合金力学性能影响见表6.1-52，变质处理对合金伸长率影响特别明显。

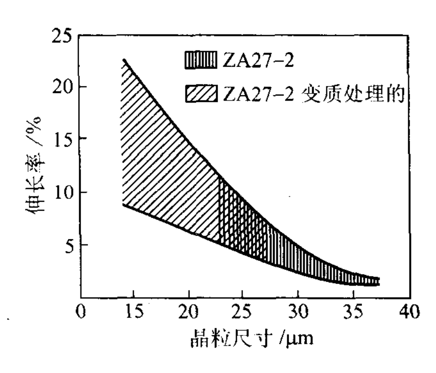


图6.1-61 ZA27-2合金的晶粒尺寸对伸长率的影响

表6.1-52 不同变质剂对ZA27-2合金（金属型铸造）力学性能的影响

序号	变质元素	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%
0	—	398~401	2~6
1	B	396~409	8~20
2	Ti-B	398~418	6~19
3	Zr	361~385	<1
4	La	393~401	12~16
5	Ce	392	13

7.1.4 配料

配锌合金用金属材料分两部分，即纯金属和中间合金（见表6.1-53）。配料基本原则是保证合金成分合格和成本低廉。因此用金属原料要从两个方面计算：一是保证成分合格的原则，不要追求高纯度。能用Zn99.95就不要用Zn99.99，锌锭化学成分见表6.1-54。应用回收料特别小心，不能掉以轻心，这是经常出问题的根源。考虑熔炼工艺，熔炼温度低

为好，熔炼时间短为佳，因此用中间合金是合理的。但是对中间合金的要求也应严格，不能混进有害杂质。锌基合金重要用途是制造压铸件，制造压铸件的锌合金必须用 Zn99.99 锌锭配料。

配料需要考虑各种元素的烧损率，见表 6.1-55。

表 6.1-53 熔炼锌合金用金属材料

材料类别	材料名称	牌号	材料类别	材料名称	牌号
工业纯金属	锌锭	Zn99.95 以上	中间合金	铝铜	AlCu50
	铝锭	Al99.95 以上		铝镁	AlMg10
	阴极铜	Cu - CATH - 2		铝钛	AlTi5
	镁锭	Mg99.95 以上		铝硼	AlB1
				铝钛硼	AlTi5B1
				铝铈	AlCe10
				铝稀土	AlRE10

表 6.1-54 锌锭的化学成分（摘自 GB/T 470—1997）

牌号	化学成分（质量分数）/%				
	Zn	杂质含量 ≤			
	≥	Pb	Cd	Fe	Cu
Zn99.995	99.995	0.003	0.002	0.001	0.001
Zn99.99	99.99	0.005	0.003	0.003	0.002
Zn99.95	99.95	0.020	0.02	0.010	0.002
Zn99.5	99.5	0.3	0.07	0.04	0.002
Zn98.7	98.7	1.0	0.20	0.05	0.005

牌号	化学成分（质量分数）/%				
	杂质含量 ≤				
	Sn	Al	As	Sb	总和
Zn99.995	0.001	—	—	—	0.005 0
Zn99.99	0.001	—	—	—	0.010
Zn99.95	0.001	—	—	—	0.050
Zn99.5	0.002	0.010	0.005	0.01	0.50
Zn98.7	0.002	0.010	0.01	0.02	1.30

注：Zn99.99% 的锌锭用于生产压铸合金，最高铅含量应为 0.003%。

表 6.1-55 熔炼锌合金时各种元素的烧损率

元素	Zn	Al	Cu	Mg
烧损率/%	1 ~ 3	1.0 ~ 1.5	0.5 ~ 1.0	10 ~ 30

若使用旧料时，锌合金中易损耗元素应补损，一般铝为 0.007% ~ 0.008%，镁为 0.01% ~ 0.02%，镉为 0.01% ~ 0.05%。

7.1.5 流动性与收缩

合金的流动性与成分有关，金属学原理指出，纯金属和共晶成分合金流动性能最好，凝固收缩时集中缩孔为主；其他合金的流动性变化和集中缩孔与分散缩孔的分配关系见图 6.1-62。

Zn - Al 合金的流动性及凝固温度范围见图 6.1-63。含铝量不同的锌合金流动性与熔炼温度的关系见图 6.1-64。

少量元素对 Zn - Al 合金的影响有的明显，有的很小。镁的影响特别显著，少量镁急剧降低 Zn - Al 合金流动性，见图 6.1-65。

铜对 Zn - Al 合金流动性的影响见图 6.1-66。

Fe、Cr、Si 和 Ni 对 Zn - Al 合金流动性的影响，见图 6.1-67 和图 6.1-68。由此可以看出，有些元素对合金流动性影响大，必须控制。有些元素对合金流动性有帮助或者影响不大，可以允许在一定范围内存在。

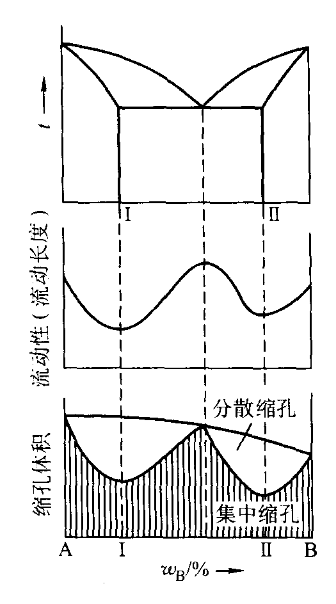


图 6.1-62 流动性和缩孔体积与合金成分的关系

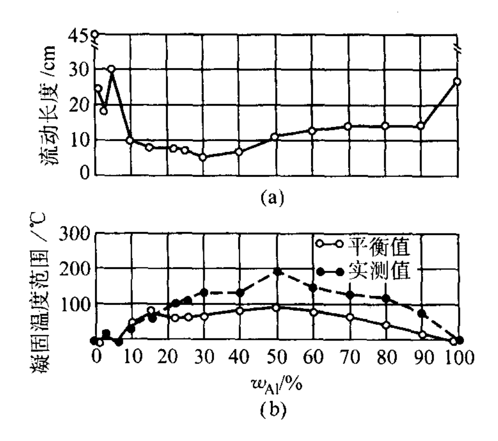


图 6.1-63 Zn - Al 合金的流动性及凝固温度范围与含铝量的关系

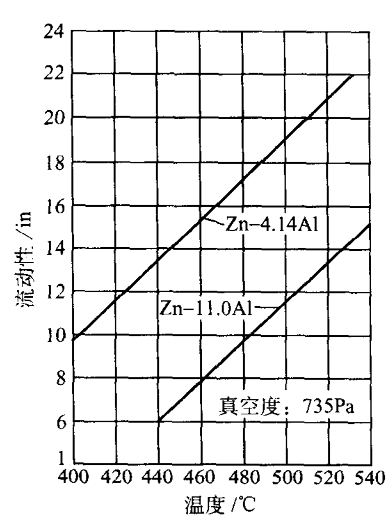


图 6.1-64 温度对流动性的影响

1 in = 25.4 mm

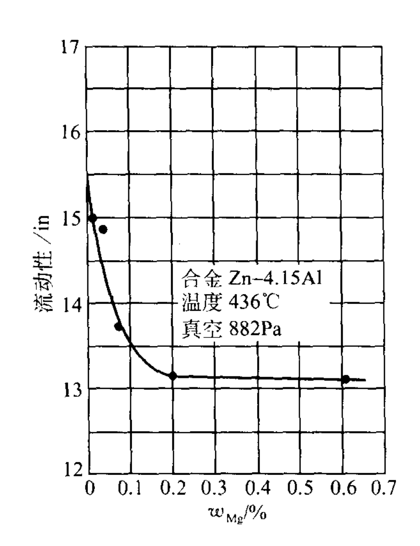


图 6.1-65 Mg 对 Zn-4.15Al 合金流动性的影响
1 in = 25.4 mm

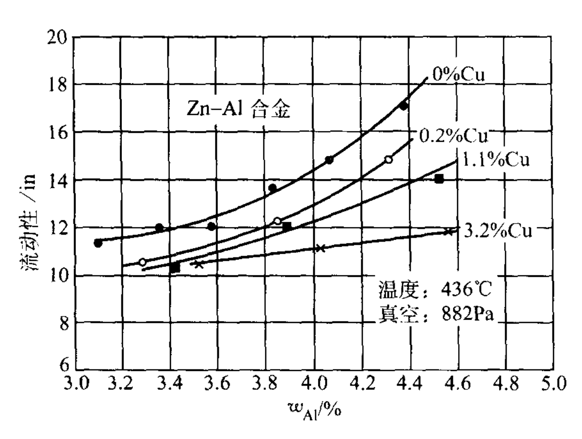


图 6.1-66 Cu 对 Zn-Al 合金流动性的影响
1 in = 25.4 mm

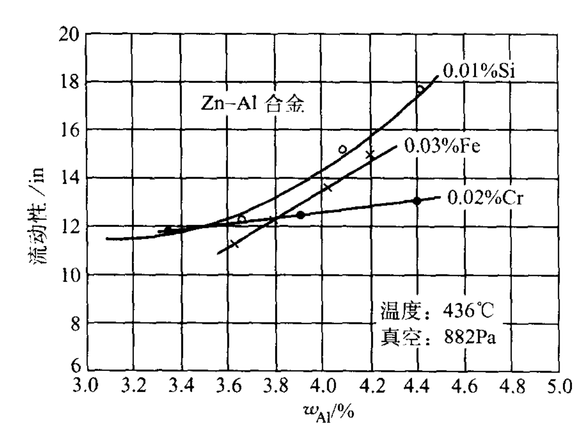


图 6.1-67 Fe，Cr，Si 对 Zn-Al 合金流动性的影响
1 in = 25.4 mm

锌合金有个特点，铸造凝固时底面收缩经常造成缺陷。ZA8-1、ZA11-1 和 ZA27-2 合金砂型重力铸造板状试件的底面缩孔缺陷的直径与浇注时合金液体过热度的关系见图 6.1-69，其缺陷直径与冒口体积的关系见图 6.1-70。

铸造锌合金的线收缩率见表 6.1-56。

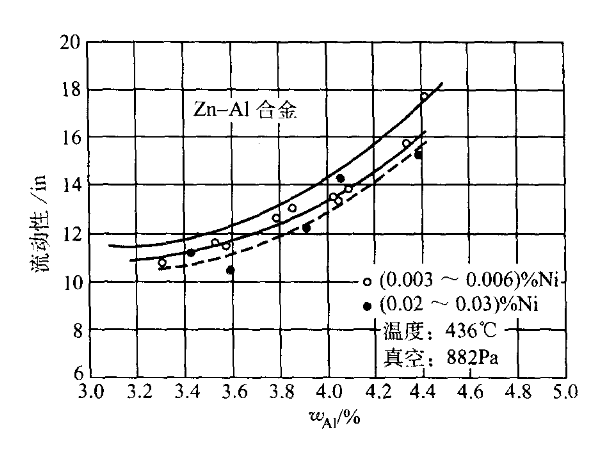


图 6.1-68 Ni 对 Zn-Al 合金流动性的影响
1 in = 25.4 mm

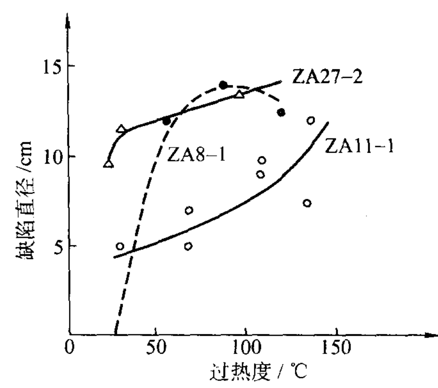


图 6.1-69 重力铸造锌合金板状试件的底面缩孔缺陷的直径与浇注时过热度的关系
（ZA8-1 和 ZA11-1 采用湿型，ZA27-2 采用 CO_2 砂型，保温冒口的直径为 63 mm）

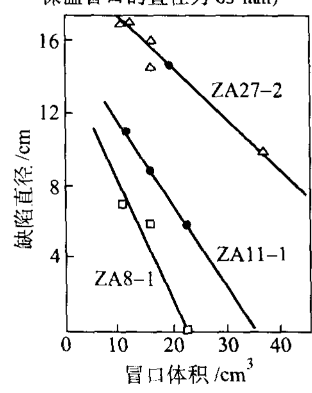


图 6.1-70 重力铸造锌合金板状试件底面缩孔缺陷的直径与冒口体积的关系（湿型浇注）

表 6.1-56 铸造锌合金的线收缩率 /%

浇注温度 /℃	ZA8-1	ZA11-1	ZA27-2	ZA4-1	ZA4-3
650	—	—	1.23	—	—
600	—	—	1.18	—	—
550	0.91	1.06	1.15	0.87	0.91
500	0.89	0.99	—	0.94	0.91

7.2 熔炼与浇注

7.2.1 熔炼

熔炼设备可采用燃油（或燃气）炉，电阻炉及感应电炉等。焦炭炉目前还有应用，缺点是温度难以控制。

熔炼过程中使用的钢铁制品（坩埚或工具），必须清理

干净，喷刷涂料并充分烘干后方可使用。涂料配方见表6.1-57。

表6.1-57 熔炼锌合金使用钢铁制品的涂料配方

配方	氧化锌	滑石粉	石墨粉	水玻璃	水
1	25~30	—	—	3~5	余量
2	—	20~30	—	6	余量
3	—	—	20~30	5	余量

熔炼工艺可根据具体条件制定，如全用纯金属熔炼或采用中间合金加合金元素方法熔炼。

（1）用纯金属熔炼工艺举例

1）将熔炼炉预热至暗红色（500~600℃）并加入木炭作为覆盖剂（电炉熔化时可以不加）；

2）加入电解铜或铜锭熔化后，用占铜量0.6%~1.0%的磷铜脱氧；

3）加入全部铝；

4）铝熔清后加入90%锌；

5）待金属液温度达到650℃以上时，用钟罩压入所需的镁量；

6）压入精炼剂或0.2%~0.3%的 C_2Cl_6 或0.1%~0.15% $ZnCl_2$ 进行精炼，待反应停止后扒渣并静置5~10 min；

7）加入剩余的锌降温，搅拌、扒渣并测温，化学成分合格，温度符合要求时即可浇注。

（2）用中间合金的熔炼工艺举例

1）将熔炼炉预热至暗红色，加入90%左右的锌，再加入中间合金；

2）加热熔化。待金属液温度达到650℃以上时，加入所需镁量；

3）必要时加入精炼剂或0.1%~0.15%ZnCl，或0.2%~0.35% C_2Cl_6 进行精炼，待反应停止后扒渣并静置5~10 min；

4）加入剩余的锌降温，搅拌、扒渣；

5）取样检验、测温。合金成分合格、温度符合要求时即可浇注。

锌合金的浇注温度一般比液相线温度高40~80℃，锌合金浇注温度见表6.1-58。

表6.1-58 铸造锌合金的浇注温度

合金代号	ZA4-1	ZA4-3	ZA8-1	ZA9-2	ZA11-5	ZA11-1	ZA27-2
浇注温度/℃	400~430	410~440	425~480	430~485	415~470	450~530	510~590

（3）阴极锌熔铸时配制锌合金

这种方法都是在锌冶炼厂阴极锌熔铸时进行。如配制压铸合金，将特高纯锌液加铝（或铝铜中间合金）在480℃混熔，搅拌约10 min，然后精炼（净化处理），精炼剂采用氯化铵（NH_4Cl），扒出浮渣后加入金属镁，调温检验合格后浇注。

7.2.2 浇注

（1）重力铸造（略）

（2）压力铸造

压力铸造用的模具设计非常重要。其基本原则：

1）从喷口到工件型腔浇口，整个送料系统的截面积应当是逐渐减小，见图6.1-71。

2）设计工件型腔充满时间（t）为6~40 ms（最佳时间为6~25 ms），浇口截面积（A）必须足够大，用式（6.1-1）计算：

$$A=\frac{W\rho}{vt} \tag{6.1-1}$$

式中，A 为浇口截面积，mm^2；v 为浇口处金属流动速度，35~50 $m\cdot s^{-1}$；ρ 为液体锌合金的密度，如YX040合金为6.1 $g\cdot cm^{-3}$；W 为压力铸造的工件质量，g；t 为模具工件型腔金属充填时间，ms。

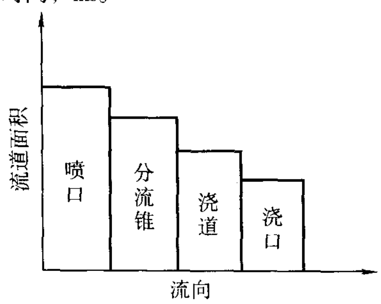


图6.1-71 送料系统截面积示意图

3）金属充填型腔时避免紊流。无论截面收缩还是放大，尽量避免直角。金属流程尽可能短，转弯要大弧度平滑通过。

4）以雾化金属液体充填型腔，如射流速度为35~55 m/s。

5）模具表面温度在160~220℃为好。需电镀的零件，模具表面温度应在180~220℃之间。模具温度过低，合金液体过早凝固，零件可能产生冷隔或不完整（未充满）；温度过高，对模具腐蚀加速，出现粘模现象。

压铸工艺对常用锌合金力学性能影响见图6.1-72~图6.1-74。

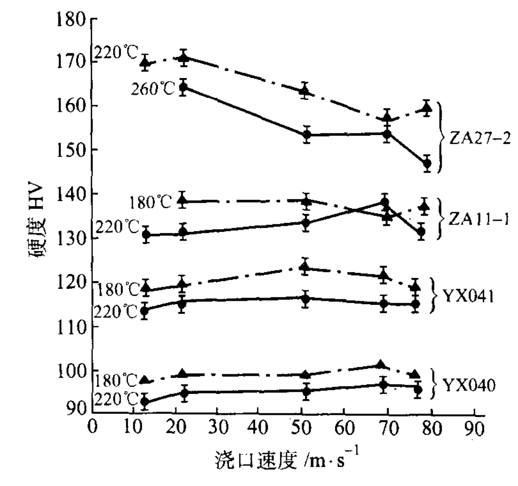


图6.1-72 压铸工艺对锌合金硬度的影响

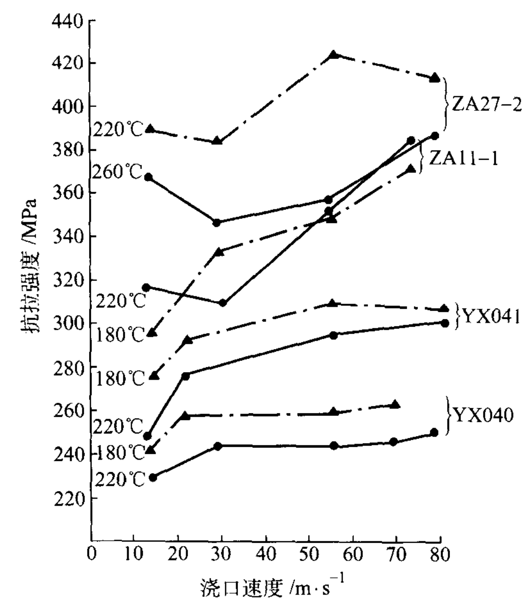


图6.1-73 压铸工艺对锌合金抗拉强度的影响

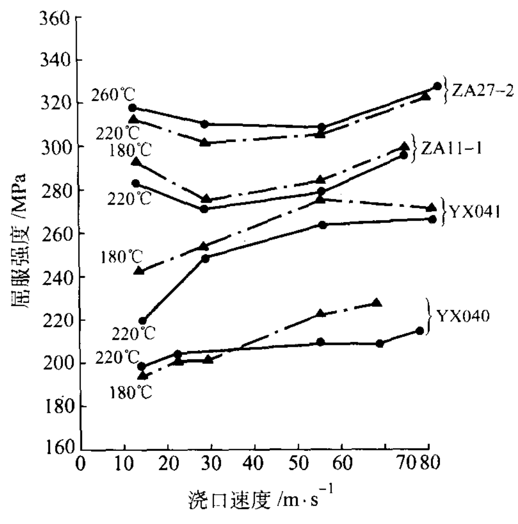


图6.1-74　压铸工艺对锌合金屈服强度

(3) 铸锭

锌及锌合金铸锭大多数采用倾斜水冷模浇注，可保证浇注液流平稳，保持液面层氧化膜不破坏，减少氧化、吸气和夹杂混入。水冷模可以生产板锭、实心圆锭和空中圆锭。目前，已采用连续铸造和连铸连轧技术。

7.3　铸造缺陷分析

锌合金铸造时应遵循顺序凝固原则。锌合铸件易出现裂纹、缩孔、缩松、冷隔、气孔、重力偏析等缺陷（见表6.1-59）。

7.4　锌的废品回收与再利用

再生锌资源主要从新、旧废品中产生。新废品主要指锌及锌合金生产和产品制造的不同阶段出现的废品。旧废品是指从废弃产品中回收的锌及锌合金。据统计，再生锌约占锌产量的35%。

锌回收的主要来源见表6.1-60。

表6.1-59　锌合金铸件中常见的铸造缺陷分析

名称	特　征	产生原因	防止方法
冷隔	为线条状、深浅不一的槽，棱角呈圆角，常发生于铸件的宽大表面、难充填的薄壁断面或金属流在型腔中的汇合处	1）浇注温度过低 2）金属氧化、流动性差 3）浇注速度过低或浇注中断 4）铸型排气不良 5）压铸时型腔中的两股金属流未完全熔合	1）适当提高浇注温度 2）改善合金的流动性 3）改进浇注系统以提高充型速度 4）改进铸型排气 5）适当提高铸型温度或对产生缺陷部位的型壁加强温度控制
气孔	孔洞大小不一，接近圆形，壁光滑，可能是集中的，也可能是成群的，不规则地分布于铸件内部、表面或接近表面处（属外源性或侵入性气孔）	1）铸型、砂芯水分过高 2）金属型涂料未烘透 3）液体金属在浇注系统中产生紊流，卷入了气体 4）型腔中的气体未及时排出	1）严格控制型、芯砂的含水量 2）金属型、芯必须先经预热，再喷涂料，喷涂料及补喷涂料后均应烘透 3）改进浇注系统设计并采用合理的浇注工艺使金属液平稳充型 4）从工艺设计上保证型，芯排气畅通
缩孔与缩松	为敞露或封闭的孔洞，通常内壁粗糙并常见树枝状结晶。缩孔可能是集中的，也可能是分散的。高铝锌合金缓慢冷却时缩孔常位于铸件底面（底面缩孔）。缩孔附近常见缩松区	1）铸造工艺设计不合理，未能保证顺序凝固 2）铸件凝固时在局部冷却缓慢处未得到充分补缩	1）设置冷铁加速局部冷却 2）冒口尺寸应适当并提高冒口补缩效率 3）降低浇注温度 4）使高铝锌合金铸件的重要表面朝上 5）进行变质处理
裂纹	裂口呈波浪形或直线形，纹路狭长，穿透壁厚或不穿透壁厚	1）铅、锡、铁、镉等有害杂质的含量超过允许值 2）铸件厚薄悬殊、转变突然，交接处圆角半径过小 3）金属型铸造或压铸时开型过早，铸件在出型时开裂 4）金属型芯歪斜或导向装置不良，取出型芯时铸件开裂	1）熔炼时严格控制杂质含量，还可对合金进行晶粒细化处理 2）改进铸件设计并正确设置浇冒口和冷铁 3）延长开型时间 4）调整好型芯和推杆
夹渣	呈不规则明孔或暗孔，孔内充塞夹渣	1）液体金属中混入或析出金属或非金属夹杂物 2）金属液表面的熔渣未清除干净并被浇入型腔	1）使用清洁的炉料，进行精炼 2）彻底清渣，使用清洁的浇注工具并防止浇注时带入熔渣
重力偏析	铸件下部含锌量较高，而上部含铝量较高	1）金属液未充分搅拌 2）浇注温度过高 3）冷却速度过慢	1）浇注前充分搅拌金属液体 2）降低浇注温度 3）加快冷却速度 4）进行变质处理

表 6.1-60　锌回收的主要来源

来　源	比例/%	来　源	比例/%
黄铜废品	42	锌片	6
镀锌废料	27	化学工业	2
锌合金废品	16	其他（包括垃圾）	1
炼钢回收烟尘	6		

表 6.1-60 中未包括锌及其合金生产企业和锌铸造企业中自身生产过程中的废品、浇道、冒口及散落锌及其合金碎块等，因为这些未流落到社会上回收废品机构。

表 6.1-60 中锌合金废品主要指社会上回收的旧废品，其来源于切碎的废汽车零部件、应用广泛的各种零件和用品（包括小五金件）等等。而锌片多由建筑行业报废的房顶排水系统、雨水槽、建筑用板材产生的。锌合金废品和锌片两项均可直接回炉生产锌及锌合金。而其他各项均为冶炼的资源。

我国锌及锌合金废料、废件分类和技术条件见国家标准 GB/T 13589—1992。

编写：田荣璋（中南大学）
王　平（中南大学）
审稿：唐仁政（中南大学）

第2章　铅及其合金

1　概述

铅的熔点低，耐蚀性能好，密度大，X射线和γ射线等不容易穿透，塑性好，线胀系数大。铅的再结晶温度低（室温以下），压力加工性能好。其硬度、强度、特别是疲劳强度和蠕变强度较小，长期使用容易由疲劳和蠕变而失效或破坏。

长期以来将其制成铅或铅合金板材、管材及铸件等广泛应用在化工、电缆、蓄电池、电解极板、容器衬里及放射性防护等工业部门。铅还用作低熔点合金、软焊料、轴承合金和印刷合金等。在一些黄铜、青铜中，铅是重要的合金元素。

1.1　铅资源与铅的冶炼

据2001年美国地质调查局统计，到2002年年底为止，世界已查明的铅资源量为15亿多吨，铅储量为6 800万吨，储量基础为1.4亿吨。世界铅储量及储量基础见表6.2-1。

表6.2-1　世界铅储量及储量基础　　万吨

国　别	储　量	储量基础
澳大利亚	1 500	2 800
中国	1 100（688）	3 600（1 135）
美国	810	2 000
加拿大	200	1 100
秘鲁	350	900
南非	200	400
世界合计	6 800	14 000

注：括号内数据为我国国土资源部按国际标准套改后的数据。

传统炼铅工艺烧结焙烧－鼓风炉熔炼法，此法是将硫化铅精矿经烧结焙烧后得到烧结块，然后在鼓风炉中进行还原熔炼产出粗铅，再精炼获得精铅。其工艺流程见图6.2-1。

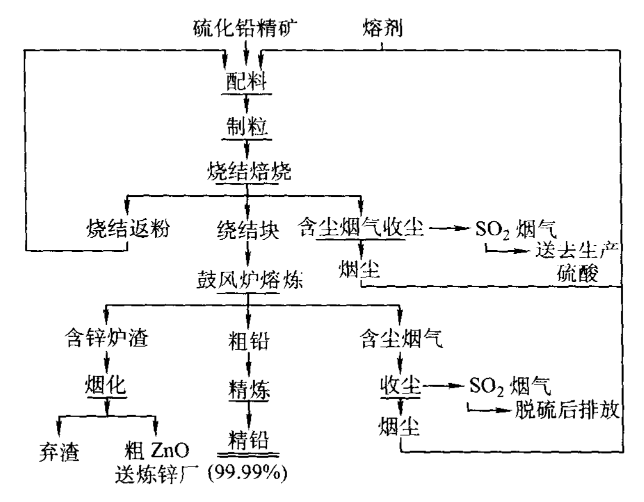


图6.2-1　铅冶炼原则工艺流程

粗铅精炼是指获得粗铅后再经过火法精炼或电解精炼，将含有2%～4%杂质的粗铅精炼成达到国家标准要求的精铅。

国家标准要求铅锭的化学成分见表6.2-2。

表6.2-2　铅锭的化学成分（摘自GB/T 469—1995）

牌号	化学成分（质量分数）/%									
	Pb ≥	杂质 ≤								
		Ag	Cu	Bi	As	Sb	Sn	Zn	Fe	总和
Pb99.994	99.994	0.000 5	0.001	0.003	0.000 5	0.001	0.001	0.000 5	0.000 5	0.006
Pb99.99	99.99	0.001	0.001 5	0.005	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.01
Pb99.96	99.96	0.001 5	0.002	0.03	0.002	0.005	0.002	0.001	0.002	0.04
Pb99.90	99.90	0.002	0.01	0.03	0.01	0.05	0.005	0.002	0.002	0.10

1.2　铅的产量及消费量

世界原生铅产量结构见表6.2-3。

表6.2-3　世界原生铅产量结构

地　区	占比例/%	地　区	占比例/%
中国	32	大洋洲	8
欧洲	22	非洲	2
北美洲	17	亚洲（中国外）	16
南美洲	3		

世界精铅产量及消费量见表6.2-4。

表6.2-4　世界精铅产量及消费量　　万吨

年　份	2001	2002	2003	2004
世界精铅产量	649.5	656	666.5	678
世界精铅消费量	641.1	652	670	681

我国铅市场情况见表6.2-5。

表6.2-5　我国铅市场供应平衡表　　万吨

年　份	2001	2002	2003	2004
精铅产量	120	132	158	168
净出口量	44	36	44	48
表观供应量	76	96	114	120
消费量	76	95	110	118
市场平衡	0	1	4	2

从以上资料看，我国是产铅大国，也是铅消费大国和铅出口大国。汽车工业的发展是拉动我国铅消费增长的重要原因。我国汽车产量及其铅酸电池耗铅量变化见图6.2-2。

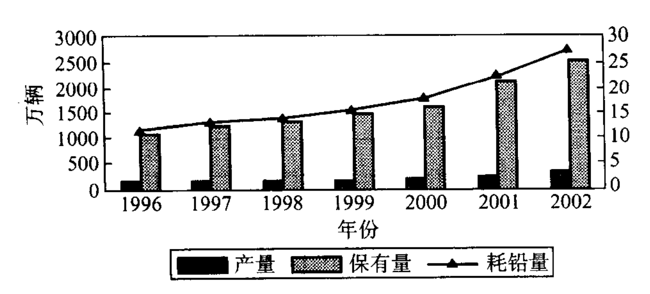


图6.2-2　我国汽车产量及保有量同精铅消耗量变化图

世界主要消费铅国家铅消费结构见表6.2-6。

表6.2-6　1998年一些主要铅消费国的消费构成　%

消费形式	美国	日本	德国	英国	法国	意大利	澳大利亚
蓄电池	90.9	72.9	56.5	33.7	70.4	60.8	66.0
电缆护套	0.4	1.0	1.0	3.1	5.1	1.5	3.1
铅管、铅片、合金等	5.5	9.8	2.3	38.3	14.5	14.8	28.7
颜料、化工产品	0	10.5	21.8	18.0	8.9	15.4	0.95
其他	3.2	5.8	0.3	6.9	0.9	3.6	1.2

我国2001年消费铅量结构见表6.2-7。

表6.2-7　2001年我国铅消费结构

消费形式	消费量/万吨	占比例/%	消费形式	消费量/万吨	占比例/%
蓄电池	51	65.2	化工产品	10.2	13.0
电缆护套	3.5	4.4	其他	4.8	6.1
各种合金	8.5	10.8	合计	78	100

近几年世界各主要消费铅的国家消费精铅的情况见表6.2-8。

表6.2-8　近几年部分国家精炼铅消费量　万吨

国家或地区	1995年	1996年	1997年	1998年	1999年	2000年	年均递增率/%
美国	147.2	154.0	165.0	172.6	174.5	166.0	2.43
中国	44.8	46.4	52.8	53.0	52.5	66.3	8.16
德国	36.8	30.3	33.9	36.2	37.4	38.9	1.12
日本	33.4	33.0	32.9	32.2	31.8	34.3	0.53
英国	28.5	27.3	27.0	27.6	28.3	30.1	1.10
意大利	24.7	28.8	25.9	26.2	26.5	27.9	2.30
法国	26.5	25.5	25.9	24.7	26.4	26.2	
世界合计	554.8	560.0	601.9	608.6	611.4	624.4	2.39

2　铅及其合金的物理冶金基础

2.1　纯铅

2.1.1　物理性质

纯铅的物理性质见表6.2-9和表6.2-10。铅是蓝灰色金属。熔点低（327.3℃），沸点高（1 740℃）和熔化热低，流动性好，适于铸造。加之密度大（11.34 g/cm^3），弹性模量低（1 500 MPa）和面心立方晶体结构，很容易实现室温下的轧制、挤压、锻造和旋压获得各种有用形状的产品。

表6.2-9　铅的物理性能

性　质	单　位	数　量	性　质	单　位	数　量
晶体结构	面心立方	fcc	25℃的热导率	W/（m·K）	35
点阵参数	nm	$a = 0.494$	线胀系数（20～100℃）	$10^{-6}K^{-1}$	29.5
相对原子质量	—	207.21	熔化潜热	kJ/kg	23
20℃的密度	g/cm^3	11.34	电导率	%IACS	8.3
熔点	℃	327.5	电阻率（20℃）	μΩ·m	0.21
沸点	℃	1 746.7	电阻温度系数（20℃）	$10^{-3}K^{-1}$	3.36
凝固的体积收缩	%	3.5	弹性模量（20℃）	MPa	1 500～1 700
比热容（100～200℃）	J/（kg·K）	129	切变模量（20℃）	MPa	780

表6.2-10　铅在高温下的物理性能

蒸气压 p		表面张力 γ		电阻率 ρ		密度 ρ	
℃	133.3 Pa	℃	10^{-5} N·cm^{-1}	℃	μΩ·m	℃	g/cm^3
987	1	350	442	327	0.946	427.4	10.686
1 167	10	400	438	400	0.980	450	10.536
1 417	100	450	438	600	1.072	650	10.302
1 611	400	500	31	800	7.164	850	10.078

高密度和低弹性模量使铅成为一种卓越的防震隔音阻尼材料。对辐射防护的性质备受重视，为了屏蔽X射线和γ射线广泛地利用铅，还可作反应堆的防护材料。

铅是一种能作为结构和耐腐蚀两种性质于一身的少有材料，如在铅酸电池中作为活性材料，充电－放电反应时承受氧化和还原作用。铅能以0，2$^+$和4$^+$价态存在。因此有构成铅酸电池的可能。铅合金作为结构使用，它容纳了活性材料的氧化铅。栅极结构必须有足够的强度，在充电氧化条件下是耐蚀的和有大电流输出。铅酸电池用铅对纯度要求很高。世界各国均有规定。影响电池特性的主要有害杂质是

Sb，As，Cu，Ni，Te，Fe和Zn等。Te和Ni是产生气体的主要元素，对于密封的铅酸电池是有害的。对生产密封的不需维修的铅酸电池尤为重要。

铅还具有优异的自润滑性能，使其成为轴承合金及垫料等优良材料。因为铅熔点低，使其成为易熔合金、软钎焊料、印刷以及保险丝合金的重要组成元素。

2.1.2 化学性质

铅在各种成分的大气、水以及常用的各种化学物质中都是极其稳定的。因此，广泛地应用于化学工业中。铅及其合金可用作制造容器及管道或容器及管道的内衬，以储存或输运酸及盐溶液。在电解工业中可制作电解槽衬里及电极。

2.1.3 力学性能

纯铅的力学性能见表6.2-11。铅在高温和低温下的力学性能见表6.2-12。

表6.2-11 室温下纯铅的典型力学性能

类别	条件	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率[3] δ/%	硬度HB (10/100/30)
腐蚀用铅[1]	砂型铸造	12~13	5.5	30	3.2~4.5
腐蚀用铅	硬型铸造	14	—	47	4.2
化学用铅[2]	未规定	16~19	6~8	30~60	4~6

①相当于Pb99.994。②相当于Pb99.96。③50 mm内伸长。

铅在低应力下就会变形并同时产生回复及再结晶过程。在应力作用下，应变与再结晶同时发生，就会产生持久的蠕变行为。因此，施加应力的大小、速度和作用时间对铅的力学性能有着很大的影响。

表6.2-12 铅在高温和低温下的力学性能

成分或状态	温度/℃	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%
加工态	265	2	20
退火态	195	4	20
100℃退火态	150	5	33
100℃退火态	82	8	24
铸态	17	28	26
99.98%铅	-196	45	34
99.98%铅	-253	71	36

各种元素对铅的硬度的影响见图6.2-3。关于铅的蠕变极限、弯曲疲劳强度见图6.2-4~图6.2-6。

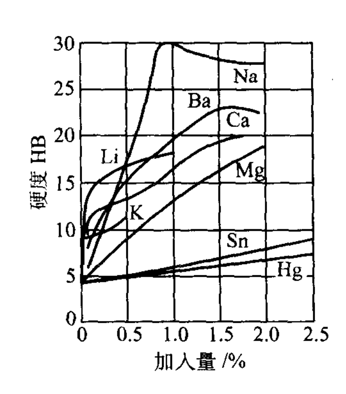


图6.2-3 元素对铅的硬度影响

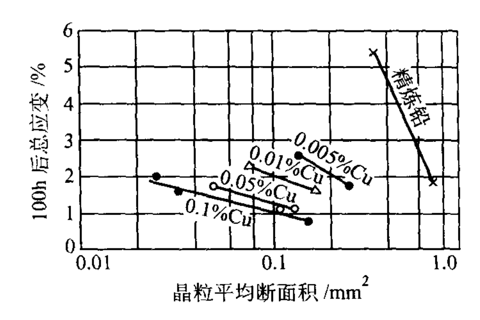


图6.2-4 在冷加工及100℃退火的铅-铅合金中，铜含量和晶粒度对蠕变极限的影响，所受应力为2.1 MPa

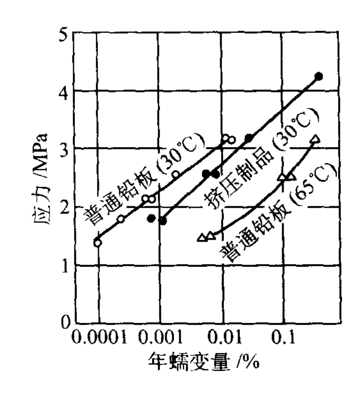


图6.2-5 铅材（99.90%Pb）的蠕变曲线

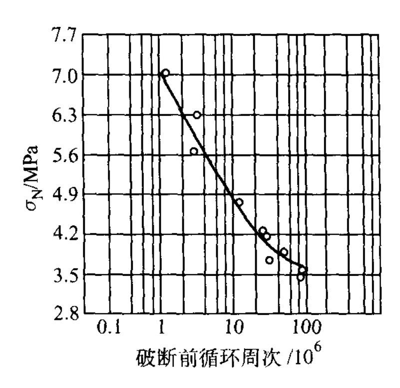


图6.2-6 铅板（99.90%Pb）的弯曲疲劳强度
（试样纵向平行于轧制方向，转速为860 r/min）

铅作为结构材料使用，首先应考虑其蠕变敏感性而不是抗拉强度。因为往往因蠕变变形使结构失效而远未达到因抗拉强度失效。解决这个问题，一是把结构设计成自撑式的，或采用其他金属作插入件或支承件；二是向铅内加入合金化元素（如Ca和Sb等），提高抗拉强度。

对铅来说，疲劳现象也是非常重要的问题。凡是能造成有循环应变应力产生的因素，如振动、温度变化等均能导致产生疲劳裂纹，使产品失效。因为疲劳裂纹往往表现为沿晶间的裂纹，细化晶粒是提高疲劳强度的方法之一。另外，加入其他元素如Cd，Sb，Sn，Te等元素使铅合金化。

2.2 铅合金物理冶金基础

2.2.1 铅合金成分与性能

铅能与多种金属形成合金。主要的工业铅合金中含有Sb，Sn，Cu，Cd和Ca等元素。此外有的合金中还含有少量的As，Ag，Se和S等。

(1) 形成共晶反应而不产生二元中间相的合金系

合金元素多数与铅形成共晶反应，而不产生二元中间相，如Pb-Ag，Pb-As，Pb-Cd，Pb-Sb和Pb-Sn等，见图6.2-7~图6.2-11。

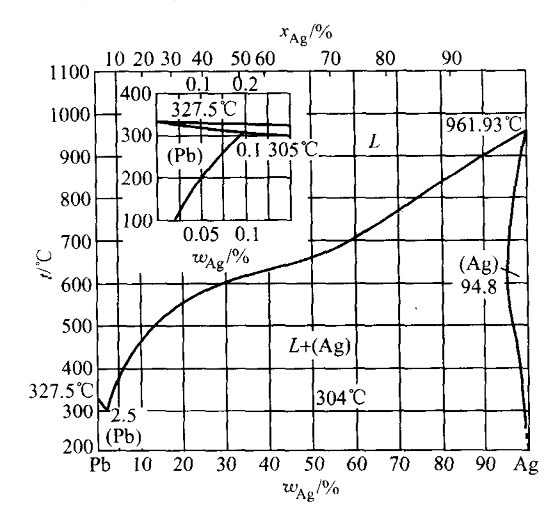


图6.2-7 Pb-Ag相图

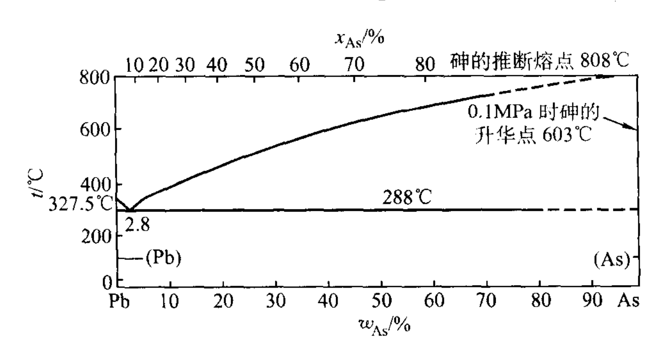


图6.2-8 Pb-As相图

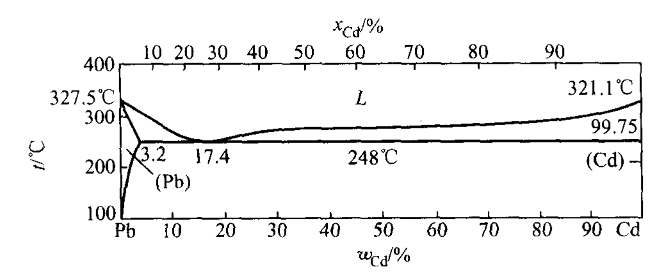


图6.2-9 Pb-Cd相图

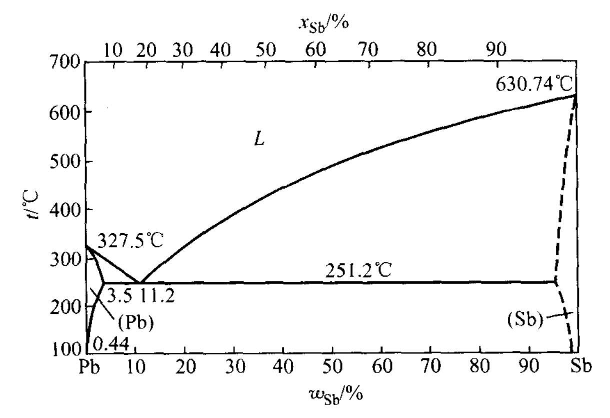


图6.2-10 Pb-Sb相图

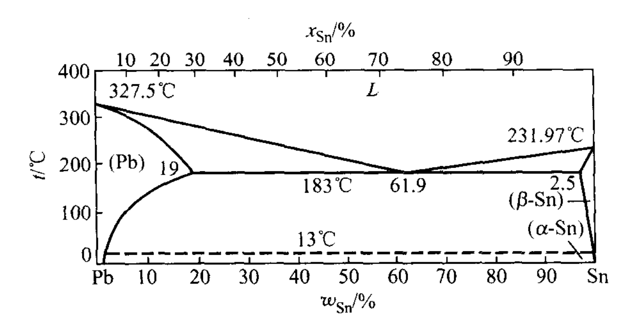


图6.2-11 Pb-Sn相图

银加入铅中可提高铅的强度和抗蠕变能力，增加对硫酸抗蚀性。共晶成分Pb-Ag合金及含1.5%Ag及1%Sn的铅合金可用作高熔点软钎焊料。含1%Ag或2%Ag的铅合金可用作电解锌时的阳极。

砷加入铅中可减少凝固时的收缩，减少孔洞和针孔的发生。砷能提高铅的硬度，当砷的含量达到0.5%时就很明显。在共晶温度（288℃）时，砷在铅中的固溶度为0.05%，在280℃固溶处理，硬度大为提高，但随后在室温下储存固溶体会脱溶，出现软化现象。砷常用在电缆护套、蓄电池、防护板及铅管道等铅合金中。

镉在铅中的最大固溶度为3.3%（248℃），当温度降到100℃时，固溶度仅为0.3%。因此，Pb-Cd合金有淬火时效硬化现象。但是，当淬火时效后随着存放时间延长（如数周）硬化会逐渐消失，故Pb-Cd二元合金工业上很少应用。因为镉能降低铅的熔点，Pb-Sn系低熔点钎焊料及铅易熔合金中少不了它。

锑是铅合金中最重要的合金元素，锑能明显提高铅的强度和硬度。亚共晶合金，随着锑含量的增加强化和硬化效应逐渐增大（见表6.2-13），约在共晶成分达到最大值。锑含量继续增加，强化效果又慢慢降低。

表6.2-13 一些Pb-Sb铸造合金的力学性能

w_{Sb} /%	抗拉强度 /MPa	硬度 HB	w_{Sb} /%	抗拉强度 /MPa	硬度 HB
0	17.25	4.0	8	51.20	13.3
1	23.46	7.0	10	52.92	14.6
2	29.00	8.0	11	52.58	14.8
4	39.05	10.1	12	57.61	15.0
6	47.20	11.8			

Pb-Sb合金时效硬化与淬火温度的关系见图6.2-12。成分处在最大固溶度（见图6.2-10）附近（~3%Sb）时，强化效果达到最大值，含锑量继续增加，时效强化效果反而下降。如果在合金中加入少量As，Cu，Ag等元素，可加速时效强化过程，使其强度和硬度等性能更为提高。

锑在铅中的固溶度随温度变化，在不过烧（共晶体不熔化）的情况下，固溶化温度越高，淬火时效效果越好。如果在淬火后立即进行变形，可加速时效过程，但由于变形而导致再结晶的发生，因为有较粗大的锑相沉淀而软化。为了得到最好的时效效果，可预先将合金在-30℃保持一段时间，然后再室温存放（这是分级时效工艺），可使合金达到最大的强化效果。

锡是铅合金中又一最重要的合金元素，Pb-Sn系合金主要用作软钎焊料。锡也是铅基轴承合金的重要组元，在某些电缆护套铅合金中也都含有锡。

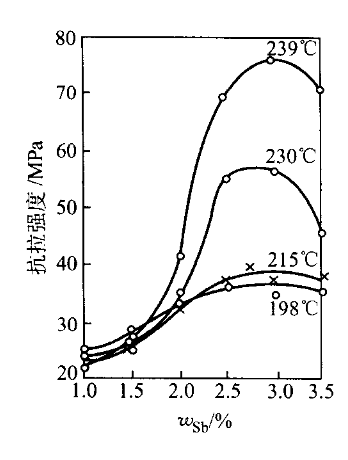


图 6.2-12　Pb－Sb合金时效硬化与淬火温度的关系（保持1 d后测量）

锡在铅中的最大固溶度（共晶温度183℃）为19%，见Pb－Sn二元合金相图（图6.2-11）。随温度降低固溶度减小，室温下为1.3左右。由此看来淬火的Pb－Sn合金在室温下会发生沉淀过程并产生时效硬化现象。但大量研究指出，过饱和铅固溶体的沉淀过程伴随着再结晶的发生，除一些合金出现瞬时时效硬化外，随着储存时间的延长均会发生软化。若淬火后立即变形，则随后发生再结晶使软化过程更为加速，共晶成分合金，这一现象更为明显。

（2）形成中间相的合金系

生成中间相的铅合金有很多，实用的有Pb－Cu，Pb－Ca，Pb－Na和Pb－Mg等合金系。

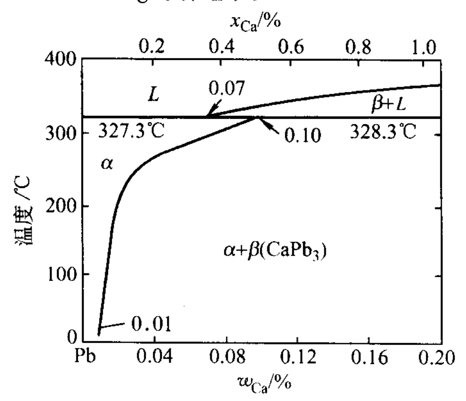


图 6.2-13　铅钙相图

由于蓄电池栅极材料日益广泛的应用，Pb－Ca合金已成为最重要的铅合金系之一。Pb－Ca二元合金相图见图6.2-13。

钙在铅中的最大固溶度为0.10%，铅和钙形成化合物$CaPb_3$，含钙量超过0.010%时，平衡状态下的组织为在铅的固溶体基体上分布着化合物$CaPb_3$。快速冷却得到的是钙在铅中的过饱和固溶体。

Pb－Ca合金固溶处理或凝固末期淬火，时效硬化效果明显（见图6.2-14）。含0.1%Ca的Pb－Ca合金时效后的强度和硬度最高。为了进一步提高其硬度，可加入Li，Ba或Na等元素。铸造后或热处理后缓慢冷却或低温下挤压可使$CaPb_3$化合物由铅固溶体中析出而导致软化。时效硬化的Pb－Ca合金室温下加工对再结晶有高的抗力。

Pb－Ca合金除用作蓄电池板栅外，还可在管线、电缆护套等方面取代Pb－Sb合金。此外，钙还可作为铅基轴承合金的重要组元。

锂与铅形成β（LiPb）化合物，锂在铅中的固溶度很小，最大为0.11%。含锂的铅合金有时效硬化现象，是Pb－Ca－Na系轴承合金的重要硬化元素。

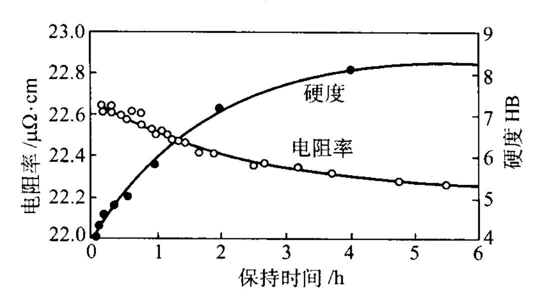


图 6.2-14　由315℃淬火的Pb－0.07%Ca合金硬度和电阻率的变化

钠在铅中固溶度最大（307℃共晶温度）为1.5%，室温约为0.2%，铅与钠形成Pb_3Na化合物。Pb－Na合金有明显的时效硬化现象（见图6.2-15）。

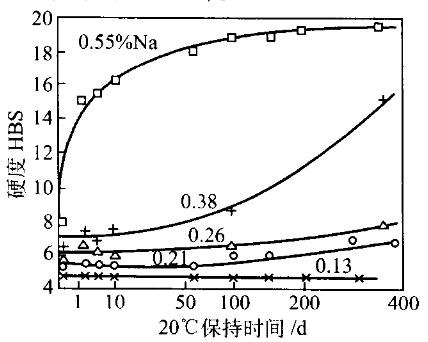


图 6.2-15　Pb－Na合金的时效硬化
试样于290℃加热6h后淬火

硫在固态铅中溶解度很小，易生成高熔点PbS化合物，而且很稳定。少量硫加入Pb－Sb系蓄电池合金中可细化晶粒，改善铸造性能。在Pb－Cu合金中加入1%S可防止其分层现象。

少量硒用作低锑多元蓄电池合金的变质剂，细化晶粒。但在熔炼时的温度过高易挥发，温度过低PbSe化合物上浮，应严格掌握熔炼工艺及加入量。

铅碲合金具有良好的疲劳性能及细晶粒结构，可用作电缆护套材料（Pb－0.1%Te）。

铅及低合金化铅合金中加入少量（<0.1%）铜，可细化晶粒，提高加热时的组织稳定性，并改善力学性能。

铋对铅的力学性能影响甚微。Pb－Bi合金对玻璃有良好的润湿性，用作金属－玻璃的钎焊材料。铋加入铅中能降低熔点（见图6.2-16）。多用来生产低熔点合金。

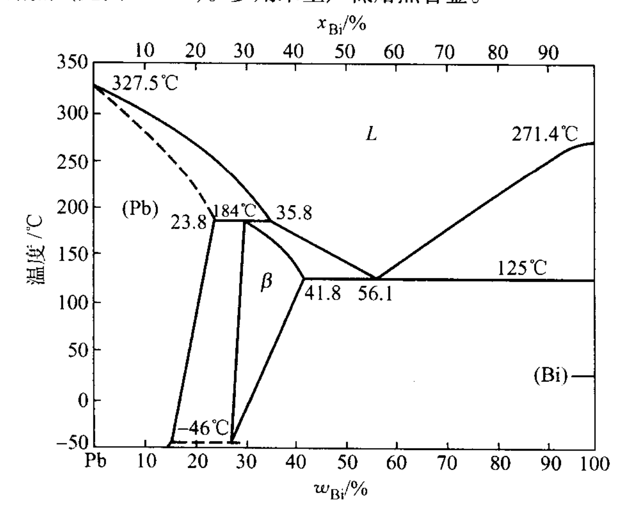


图 6.2-16　Pb－Bi相图

汞可用作某些铅基轴承合金中的硬化组元，也是低熔点合金的重要组成元素。但汞有毒，应注意。

铅和铟能形成大范围固溶体。在铅基和铟基固溶体之间生成 β 相。铟在铅中的主要应用是作轴承的表面层。Pb - In 合金也用作玻璃钎焊材料。

2.2.2　变形和再结晶

铅的熔点低，铅的再结晶温度在室温以下。因此，在室温下变形，会同时发生动态回复和动态再结晶过程。加入其他元素，可抑制或延缓再结晶。一般来讲，加入与铅生成脆性金属间化合物的元素，如 Pt，Pd，Se，Au，Ba，Li，K，Na，Mg，Ca 和 Te 均使再结晶温度升高。金属间化合物的熔点愈高，影响再结晶作用愈大。而加入不生成脆性金属间化合物的元素，如 Zn，Hg，Tl，Sn，Sb 和 Bi，则对再结晶温度影响甚微。Ag 与 Pb 虽然不是形成脆性金属间化合物元素，也有明显地延缓铅的再结晶过程。加入大量的 Sb 亦有阻碍再结晶的作用。

在常规变形条件下，铅及铅合金在变形时或变形后保持一段时间即能软化。软化的程度与变形速度、变形温度和变形后保持的时间有关。变形速度快，硬化程度大，软化趋势小（见图 6.2-17）。

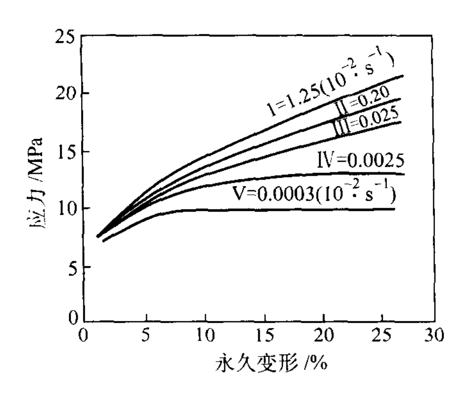


图 6.2-17　软铅压缩时流变抗力与变形速率变化间的关系

铅及其合金再结晶完成后，晶粒会长大，直至停止长大时，才为实际的晶粒尺寸。不溶或部分溶解铅中的杂质会使再结晶晶粒细化，如万分之几的 Cu，Ni，Te 和 Ca 及大量的 Sb 和 Sn 均可使铅的再结晶晶粒变细，见图 6.2-18。

2.2.3　铅的强化

铅的强化有以下三种方法。

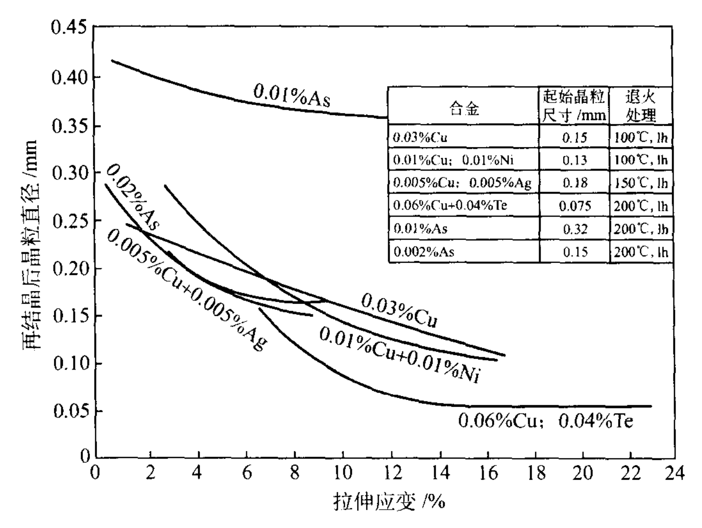


图 6.2-18　变形程度对不同铅合金再结晶后晶粒尺寸的影响

1）固溶强化　固溶强化是铅有效强化方法之一。固溶强化效果大小与铅和溶质元素原子半径差有关，相差越大，强化效果越好；也与溶质原子与铅原子间相互作用，也就是原子间结合力大小有关；还与固溶度大小有关。

如果第二相的溶解度随温度而改变，即能够经过热处理获得过饱和固溶体，时效强化也是许多铅合金的重要强化途径。如 Pb - 3%Sb 合金在铸造后或热挤压后快速冷却，或固溶处理均可得到过饱和固溶体，过饱和固溶体是亚稳定的，有自发向平衡态转化的趋势，发生脱溶，沉淀出分布均匀弥散细小的第二相（β 相），使铅合金强化，见图 6.2-19。

实践证明，在 Pb - Sb 合金中加少量（0.05% ~ 0.1%）砷或（0.01%）银，能促进 Pb - Sb 合金时效过程，见图 6.2-20。

2）时效强化　Pb - Ca 合金有明显的时效强化效应。含 Ca 量约为 0.1%时时效后具有最大的硬度和强度。在 300℃ 淬火后不同温度下时效的 Pb - Ca 合金的抗拉强度见图 6.2-21。Pb - Ca 合金加 Sn 会阻碍时效强化过程。

3）弥散强化　提高铅合金强度的第三个方法是弥散强化，即多相结构强化。通过铅固溶体分解可得到多相组织，或在铅中加入几乎不溶解于铅的元素，如 Cu 或 Ni 等，生成大量的第二相。这种第二相稳定性高，在较高的温度下也能保持较高的强度。

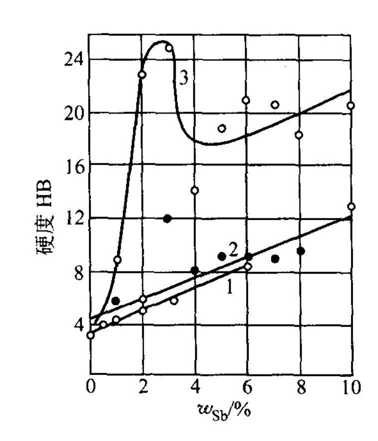


图 6.2-19　铅 - 锑合金的硬度与含锑量的关系

1—均匀化并淬火；2—自 235℃淬火；
3—自 235℃淬火及时效

2.2.4　铅及其合金的蠕变

铅及其合金的熔点低，在室温下就会发生明显的蠕变现象。在设计铅合金结构时，必须以其蠕变强度作为考虑基础。

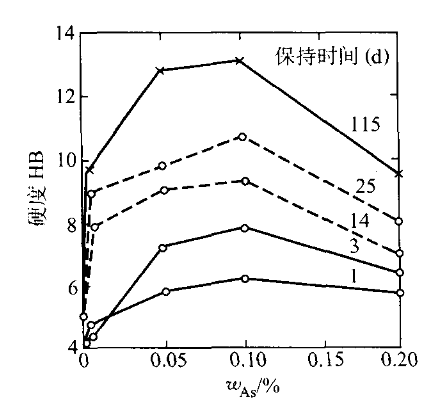


图 6.2-20　砷对 Pb－1%Sb 合金时效强化的影响

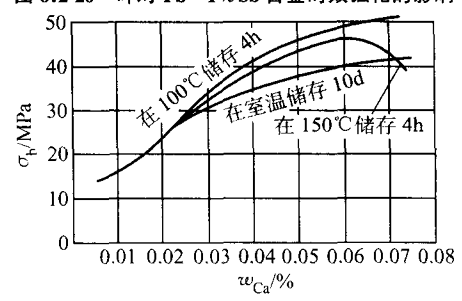


图 6.2-21　铅－钙合金从 300℃淬火后在不同温度下储存后的强度

铅合金常见蠕变曲线如图 6.2-22。这些不同应力作用下的曲线可分成两个部分：第一部分为蠕变的减速阶段，即蠕变速率随时间延长而逐渐降低，称为瞬态蠕变阶段；第二部分为蠕变的恒速阶段（直线部分），蠕变速率保持不变，称为恒态蠕变阶段。实际上，若进一步延长时间，在稳态蠕变之后出现第三部分，即蠕变加速阶段，最后导致材料的失效或破断。

铅及其合金达 1% 伸长时所需时间见图 6.2-23。

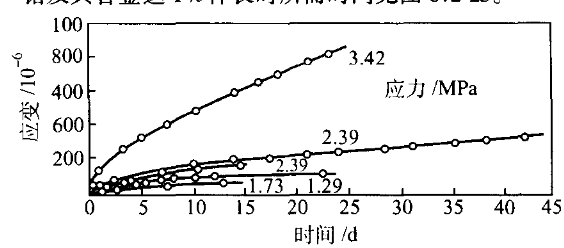


图 6.2-22　Pb－1.0Sb－0.04As 合金的蠕变曲线

2.2.5　铅及其合金的疲劳强度

铅及其合金制品经常受反复循环应力作用，最终造成疲劳破坏，金相组织呈晶间断裂形式（见图 6.2-24）。疲劳破坏不容易被发现，往往酿成重大事故，应给予重视。

合金在反复循环应力作用下，经常在晶界、夹杂物及第二相的界面处，或在滑移带与合金基体交界处产生裂纹。随着工作时间的延长，裂纹不断扩展直至断裂。

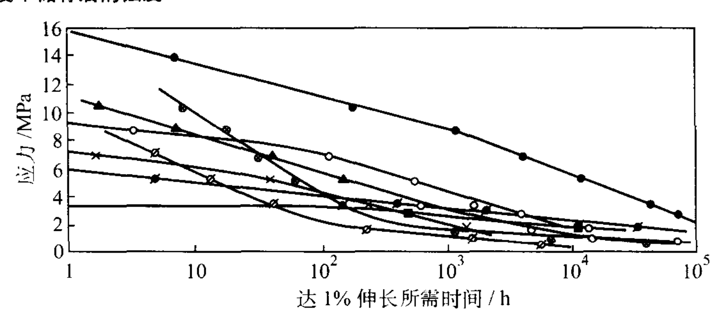


图 6.2-23　铅及铅合金达 1% 伸长所需时间

●纯铅 + 0.27%Ca
○化学用铅 + 1%Sb
× 纯铅 + 0.06%Te
化学用铅
■纯铅
} 实验室中挤压；
⊗化学用铅 + 0.9%Sb
ø 二次铅 + 0.7%Sb
} 电缆套



图 6.2-24　Pb－1%Sb－0.05%As 合金平板弯曲试验疲劳裂纹 ×200

工作环境如周围介质、振动、温度、晶粒尺寸、外力作用大小以及循环频率对合金疲劳破坏都有影响。纯铅和 Pb－1%Sb 合金在每分钟 1/4 周次及每分钟 1650 周次频率下疲劳寿命区别见图 6.2-25。图 6.2-25 说明制品寿命随循环频率增加而增长。振动频率对铅及其合金耐久性的影响见表 6.2-14。说明随振动频率增加而寿命降低。周围介质及保护层对铅及其合金的耐久循环数的影响见表 6.2-15。

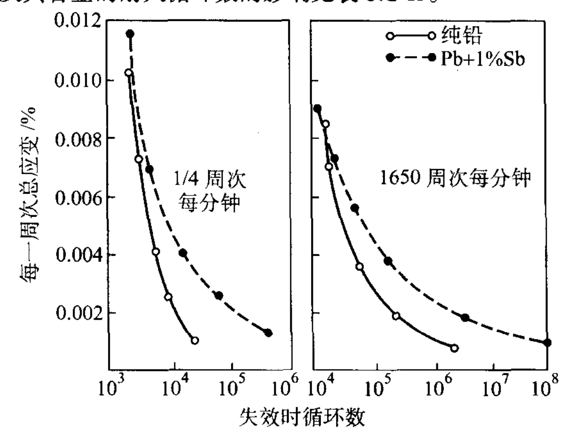


图 6.2-25　频率对失效时应变循环数的影响

表 6.2-14 循环速度对铅合金在旋转弯曲条件下耐久性的影响

材料	应变率/%	失效时循环数		失效时间/h	
		3 000次/分	1.35次/分	3 000次/分	1.35次/分
纯铅	0.1	0.09×10^6	4 700	0.5	58
Pb-0.2Sb-0.4Sn	0.1	0.2×10^6	16 600	1.1	205
Pb-0.85Sb	0.1	1.0×10^6	100 000	5.5	1 230

表 6.2-15 周围介质保护层对铅及铅合金疲劳抗力的影响

材料	介质或保护层	应力半程/MPa	耐久循环数/10^6
Pb	空气	0.54	1.3
	醋酸	0.54	8.5U①
	菜子油	0.54	7.9
	凡士林	0.62	9.8U①
Pb-1.5%Sn-0.25%Cd	空气	1.01	1.6
	石油沥青	1.24	9.3U①
Pb-0.5%Sb-0.25%Cd	空气	1.24	1.3
	菜子油	1.39	9.6
	凡士林	1.39	6.4

① U表示未破断。

2.2.6 铅及其合金的耐蚀性能

作为耐蚀材料，铅及其合金应力首选材料，因为它在大多数的环境中相当稳定。这是当铅暴露在腐蚀性溶液中时表面形成一层钝态的、不可渗透的、不溶解的保护膜的缘故。只要钝态膜未被损伤或破坏，它就能保护铅的表面。

铅在各种介质中的腐蚀主要是电化学腐蚀。电偶电池、浓差电池、温差电池以及因成分和组织不均匀性导致的微观电池均是铅发生腐蚀的根源。在大多数溶液中由于形成了不导电的膜，铅及其合金是耐电池腐蚀的。但是，与贵金属接触时，铅遭受电池腐蚀。

铅在一些化学试剂水溶液中的腐蚀速度与溶液的 pH 值有关系，见图 6.2-26，说明铅在中性溶液中有良好的耐蚀性。铅对硫酸有极好的耐蚀性（见图 6.2-27）。当硫酸浓度为70%～80%，温度升高到50℃时，铅仍有极好的耐蚀性，因为铅表面生成一层硫酸铅保护膜，只有当硫酸的浓度超过80%，或温度再升高时，保护膜破溶解，铅遭到腐蚀。

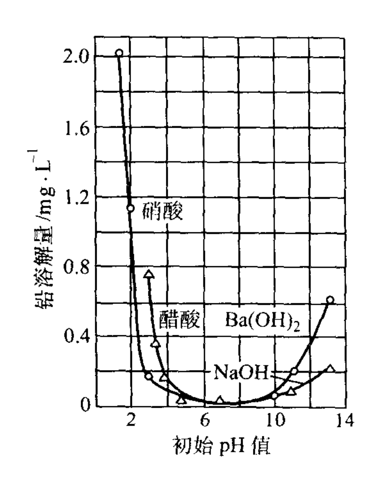


图 6.2-26 铅的腐蚀速度与溶液 pH 值的关系

铅不耐硝酸腐蚀，因为生成的硝酸铅容易水解。浓度约28%的硝酸对铅的腐蚀最快。但当硝酸浓度超过60%时，在室温下铅的腐蚀速度显著变慢。铅在盐酸中不稳定，但对磷酸、亚硫酸、铬酸等有良好的耐蚀性，对多数有机酸耐蚀。在浓醋酸、不含氧的草酸、酒石酸和脂肪酸中均很稳定，但在含氧的稀醋酸、蚁酸中迅速被腐蚀。

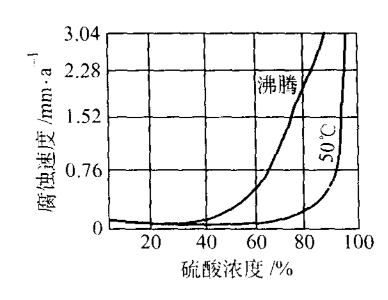


图 6.2-27 铅在硫酸中的腐蚀速度与浓度和温度的关系

铅在强碱性溶液中不像在盐酸中腐蚀那样激烈，而在碱土金属氢氧化物水溶液中又比在碱金属氢氧化物水溶液中的腐蚀速度大得多。

铅在酸性溶液中与 Fe 或 Cu 等金属接触时，铅为阴极，可作为不溶解的阳极用于 Zn，Ni 或 Cu 的电解。还可用于生产 MnO_2、镀铬和使用施加的电流进行电池保护的阳极。用作电解阳极的铅加入少量 Ag，Sn，Sb，Ca 和 As 等元素形成铅合金，耐蚀性能优于纯铅。

铅在碱性溶液中与 Fe 或 Cu 等金属接触时，其腐蚀速度较快。

铅埋在地下使用，受土壤、地下水和漏散电流腐蚀，因腐蚀环境和介质复杂，监控困难，应特别注意。

3 铸造铅合金

3.1 铸造铅锑合金

Pb-Sb 合金应用广泛，主要用在铅酸电池上，也用作军火、电缆护套、阳极、轴承、焊料等。

所有工业用 Pb-Sb 合金都是亚共晶合金。慢冷时，含量低于3.45%Sb 的合金应为固溶体。实际上生产中冷却较快，结晶偏析的结果，含量超过1%Sb 时合金中就有共晶体存在。就是低于1%Sb 的合金晶粒内也能看到锑的偏析。

铸造 Pb-Sb 合金，尤其是锑含量为0.5%～5.0%的合金，有淬火时效强化效应。其他合金元素，如 As，Cu，Sn，S 和 Se 随凝固条件不同，对力学性能也有影响。

不同含锑量的铸造 Pb-Sb 合金，固溶处理后时效对力学性能的影响见表 6.2-16。淬火温度对 Pb-3%Sb 合金力学性能影响见表 6.2-17。可以看出：在给定的锑含量范围内，锑含量越高，合金元素强化效果越好；淬火后时效 30 天比时效 1 天强化效果大。由于含锑量的不同，合金组织不同，时效强化效果也不同，如屈服强度，含1%Sb 提高 5.5 MPa，2%Sb 提高 13.8 MPa，3%Sb 提高 21.2 MPa，6%Sb 提高 15.8 MPa，而含11%Sb 提高值与含1%Sb 的相同。其中含3%Sb 的 Pb-Sb 合金淬火时效效果最佳，必须是在能取得最大过饱和溶解度的情况下，也即在240℃左右淬火，温度不能低（见表 6.2-17），若温度再高需防止过烧（晶界熔化，共晶温度为252℃）。

铅酸电池 Pb-Sb 合金除用作接头和接线柱，大量用作正栅极的，采用5%～11%Sb 的铅合金。大型管状栅极用9%～11%Sb 的铅合金，这种合金中共晶体较多，流动性好，铸造性能好。但这种合金有个缺点，充电时正栅极被腐蚀。氧化了的锑离开正栅极进入电解液并镀到阴极上，在阴极的锑降低了电解液中水，水离解为 H^+ 和 O^{2-}，在充电时放出气体消耗水，必须补充水，使电池维修困难。

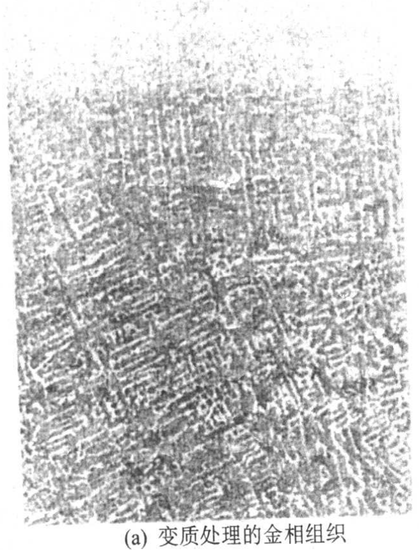
表 6.2-16　时效 Pb - Sb 合金的力学性能

锑含量/%	25℃时效后的屈服强度/MPa		抗拉强度/MPa	伸长率/%
	1 d	30 d	30 d	30 d
11	68.9	74.4	75.9	5
6	55.2	71.0	73.8	8
3	34.0	55.2	65.5	10
2	24.1	37.9	46.9	15
1	13.8	19.3	37.9	20
0	3.5	3.5	11.7	55

表 6.2-17　淬火温度对 Pb - 3%Sb 合金在 25℃时效 1 d 的强度的影响

淬火温度/℃	抗拉强度/MPa
238	75
230	56
215	38
198	34

为了减少气体溢出而减少含锑量，从而选用 1.5% ~ 2.75%Sb 的 Pb - Sb 合金做正栅极。在这个成分范围内，结晶温度间隔大，流动性差，铸造性能变坏。在合金凝固时，粗大枝晶结构引起热裂，凝固后晶粒粗大（见图 6.2-28b），在栅极网格交叉处，夹杂、缩孔和裂纹集中，铸件变脆。为了防止热裂和提高铸件塑性，对合金进行变质处理，加入少量的 S，Cu 或 Se 等元素，增加非自发结晶核心，使晶粒细化（见图 6.2-28a）。


(a) 变质处理的金相组织

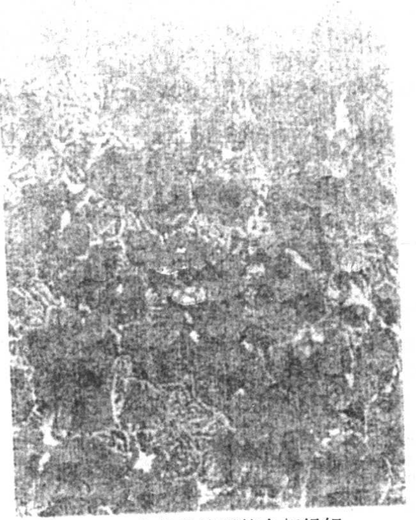

(b) 未变质处理的金相组织

图 6.2-28　Pb - 3.5%Sb 合金金相组织

Cu 与 As，S 或 Sb 作用生成 Cu_3As，Cu_2S，或 Cu_2Sb。S 和 Se 与 Pb 作用生成 PbS 或 PbSe。在 Sb 含量较高时用 Cu 和 Se，而在 Sb 含量较低时用 Se 为佳。

向低 Sb 合金中加入 Sn 能提高合金流动性，但应注意可能影响变质剂的作用。

为了降低 Sb 含量，推荐使用 Pb - Sb - Ca 合金，除了显著减少 Sb 向负栅极转移外，还能具有高 Sb 合金的一些优良铸造性能。Ag 能明显提高 Pb - Sb 合金的抗拉强度和抗蠕变能力，还能增加腐蚀层的导电性。

含 0.5% ~ 1%As 的 Pb - Sb 合金铸造成的电解提纯 Cu，Ni 和 Cr 的阳极，或电镀工艺中的阳极，有相当好的力学性能和流动性，可铸造成形状复杂而准确的阳极不规则的表面。阳极抗腐蚀主要靠其表面生成的 PbO_2 保护层。当电流中断时，Pb - Sb 合金阳极抗钝化并能在电镀液中保持长时间不被破坏。

含有 6% ~ 10%Sb 和 0.5% ~ 1.0%Ag 的合金用作管道保护，钻油井平台和远洋船作应用电流期间的阳极。加 Ag 减少含氯化物环境的腐蚀作用。

3.2　铸造铅钙合金

Pb - Ca 合金广泛地用在电源电池中，用作电话运行、海中的电池和 SLI 差动电池的负栅极，也做轴承合金用。

Pb - Ca 合金的良好流动性，能铸造成极薄的栅极。在铸造过程中快速凝固，在较高的温度下脱模，其力学性能取决于冷却速度和含 Ca 量。因为 Pb - Ca 合金中 Pb_3Ca 相在淬火时效时有强化效应，见表 6.2-18。

表 6.2-18　铸造 Pb - Ca 合金的力学性能

w_{Ca}/%	抗拉强度/MPa	伸长率/%	应力断裂（20.7MPa）/h
0.03	30.7	40	1
0.04	36.8	40	10
0.06	42.9	40	40
0.08	46.4	30	40
0.10	47.8	35	10
0.12	43.2	40	5
0.14	39.2	40	2

在 Pb - Ca 合金中加 Sn，能提高其力学性能和耐蚀性能，含 Sn 量高时作阳极使用不钝化。钙和锡对 Pb - Ca - Sn 合金力学性能的影响见表 6.2-19，对耐蚀性能的影响见表 6.2-20。

表 6.2-19　铸造 Pb - Ca - Sn 合金力学性能

项　目	合金 1	合金 2	合金 3	合金 4	合金 5
w_{Ca}/%	0.06	0.08	0.08	0.12	0.12
w_{Sn}/%	0.50	0.50	1.0	0.5	1.0
抗拉强度/MPa	46.4	50.0	57.1	50.8	57.1
伸长率/%	20.0	35.0	20.0	35.0	30.0
应力断裂（20.7 MPa）/h	150.0	100.0	450.0	12.0	120.0

表 6.2-20 铸造的含有0.065%Ca的Pb-Ca-Sn合金在H_2SO_4中的腐蚀

w_{Sn}/%	腐蚀速度/mm·a⁻¹	w_{Sn}/%	腐蚀速度/mm·a⁻¹
0	0.365	1.00	0.289
0.25	0.345	1.25	0.279
0.50	0.307	1.50	0.268
0.75	0.295		

4 变形铅及铅合金

4.1 变形铅的牌号、成分和用途

变形铅的牌号、成分和用途见表6.2-21。

4.2 变形铅锑合金

与铸造材料比较，轧制或挤压变形的Pb-Sb合金产品明显地容易破坏，并有高得多的蠕变速度。表6.2-22示出了铸造和轧制的Pb-6%Sb合金的力学性能。

表 6.2-21 变形铅的牌号、成分及用途

铅的牌号	化学成分/%												产品及用途举例
	Pb ≥	杂质 ≤											
		Ag	Cu	Sb	Sn	As	Bi	Fe	Zn	Mg+Ca+Na		总和	
Pb1	99.994	0.000 3	0.000 5	0.000 5	0.001	0.000 5	0.003	0.000 5	0.000 5	0.003		0.006	铅粉和特殊用途制造板、带、箔、管、棒、线等，用于国防、化肥、农药、化学纤维、造船、电气等部门，用作耐酸、耐蚀、防御等材料
Pb2	99.99	0.000 5	0.001	0.001	0.001	0.001	0.005	0.001	0.001	0.003		0.01	
Pb3	99.98	0.001	0.001	0.004	0.002	0.002	0.006	0.002	0.001	0.003		0.02	
Pb4	99.95	0.001 5	0.001	0.005	0.002	0.002	0.03	0.003	0.002	Mg 0.005	Ca+Na 0.002	0.05	
Pb5	99.9	0.002	0.002	Sb+Sn 0.01		0.005	0.06	0.005	0.005	0.01	0.04	0.10	
Pb6	99.5	0.002	0.09	Sb+Sn+As 0.25			0.10	0.01	0.01	0.02	0.10	0.5	

表 6.2-22 铸造和轧制的Pb-6%Sb合金的力学性能

性能	铸造的	轧制的
抗拉强度/MPa	73.8	30.6
屈服强度/MPa	71.0	19.5
伸长率/%	8	35
应力断裂（20.7 MPa）/h	1 000	1.5

变形时，共晶强化网络被破坏并破坏成小片。为了防止开裂，大部分轧制在高温下进行，此时合金经历了再结晶。轧制和挤压的Pb-Sb产品在化学工业中已被不锈钢和塑料代替，但在H_2SO_4生产系统中找到了广泛的用途，以及制造酸和硫酸盐的加热和冷却螺管。在合金中加入As和Cu提高了高温下的蠕变抗力。由于力学性能差，在连续的铅酸电池栅格生产中已经不用轧制的Pb-Sb合金了。

含有0.5%～1.0%Sb的铅合金用做电话和纤维光缆的护套。这些合金普遍地比Pb-Cu，Pb-Sn的强度高，且更抗蠕变，Pb-Sn-As合金也做电缆护套使用。锑量小于0.6%的Pb-Sb合金能被连续挤制，这种合金是不透潮湿和油的，并能长时间保持柔韧性，也不时效硬化。

铅及铅锑合金板（GB/T 1470—1988)、管（GB/T 1472—1988）和棒（GB/T 1473—1988）的化学成分见表6.2-23。铅及铅锑合金线（GB/T 1474—1988）化学成分除没有PbSb8外，其余完全与板、管、棒的化学成分相同。

表 6.2-23 纯铅及铅锑合金化学成分

金属分类	牌号	主成分/%		杂质含量/%≤								
		Pb≥	Sb	Ag	Cu	Sb	As	Bi	Sn	Z	Fe	总和
纯铅	Pb1	99.994	—	0.000 5	0.001	0.001	0.000 5	0.003	0.001	0.000 5	0.000 5	0.006
	Pb2	99.9	—	0.002	0.01	0.05	0.01	0.03	0.01	0.02	0.002	0.1
	Pb3	99.0	—	0.003	0.1	0.5	0.2	0.2	0.2	0.01	0.01	1.0
铅锑合金	PbSb0.5	余量	0.3～0.8	—	—	—	0.005	0.06	0.008	0.005	0.005	0.15
	PbSb2		1.5～2.5	—	—	—	0.010	0.06	0.008	0.005	0.005	0.2
	PbSb4		3.5～4.5	—	—	—	0.010	0.06	0.008	0.005	0.005	0.2
	PbSb6		5.5～6.5	—	—	—	0.015	0.08	0.01	0.01	0.01	0.3
	PbSb8		7.5～8.5	—	—	—	0.015	0.08	0.01	0.01	0.01	0.3

注：铅含量按100%减去杂质含量的总和计算，所得结果不再进行修约。

变形Pb-Sb合金不同含锑量、热处理工艺与力学性能的关系见图6.2-29。蠕变强度与温度和含锑量的关系见图6.2-30。

不同变形Pb-Sb合金淬火后自然时效硬度的变化见图6.2-31。

Pb-Sb合金各种状态下的力学性能见表6.2-24。

Pb-Sb合金的力学性能与温度的关系见图6.2-32。变形（加工）Pb-Sb合金的牌号、成分和用途见表6.2-25。

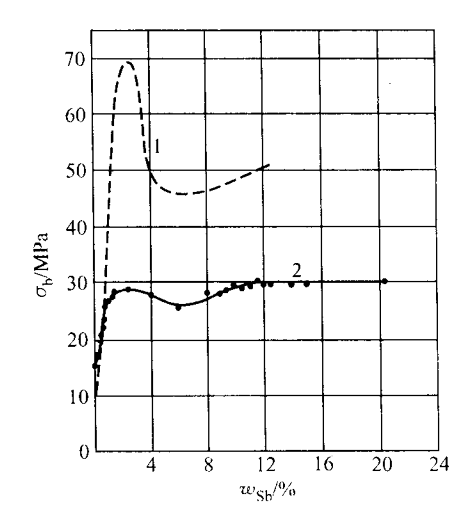


图 6.2-29　铅-锑合金的抗拉强度与含锑量和热处理工艺的关系
1—线材，235℃淬火，储存70 d；
2—线材，235℃淬火，110℃时效7周

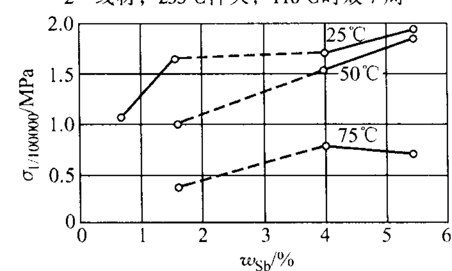


图 6.2-30　不同含锑量的铅-锑合金在各温度下，当蠕变速度为 $1\times10^{-7}h^{-1}$ 时的蠕变强度

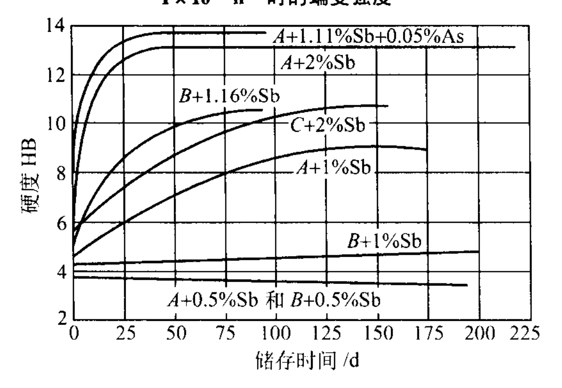


图 6.2-31　240℃淬火的铅-锑合金在室温下储存时间对硬度的影响
A—99.96%Pb+0.022%Bi+0.014%Cu；
B—99.994%Pb；C—99.990%Pb

表 6.2-24　铅锑合金的力学性能

性　能	制品种类	合金牌号		
		PbSb4	PbSb6	PbSb8
抗拉强度 σ_b/MPa	铸造品	39.4	47.8	52.0
	轧制品	28.1	29.5	32.3
	挤制品	21.8	23.2	23.2
伸长率 δ/%	铸造品	22	24	19
	轧制品	50	50	30
	挤制品	58	65	75
布氏硬度 HBS	铸造品	10	12	13
	轧制品	8	9	9
	挤制品	9	11	12
疲劳强度 σ_N ($N=2\times10^7$) /MPa	轧制品	10.55	10.55	12.30
	挤制品	—	8.4	—
蠕变强度 $\sigma^{30}_{1/10\,000}$/MPa	轧制品	1.76	2.81	2.81
	挤制品	1.48	—	—

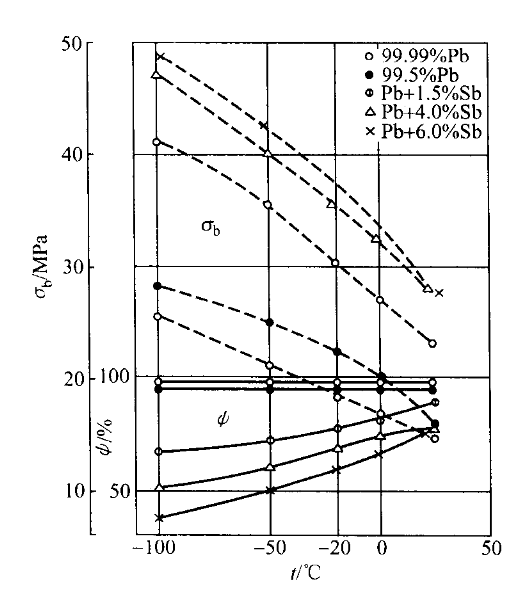


图 6.2-32　铅和铅-锑合金的性能与温度的关系
------σ_b；——ψ

表 6.2-25　变形铅-锑合金的牌号、成分及用途

牌　号	化学成分/%											产品类别	用途举例
	主成分		杂质　≤										
	Pb	Sb	Ag	Cu	Sn	As	Bi	Fe	Zn	Na+Ca	总和		
PbSb0.5	余量	0.3～0.8	0.001 5	0.002	0.008	0.005	0.06	0.005	0.005	0.03	0.15	板、带、箔、管、棒、线	适用于国防、化肥、化学纤维、农药、造船、电气等部门，作耐酸、耐蚀、防御等材料
PbSb2	余量	1.5～2.5	0.001 5	0.005	0.008	0.01	0.06	0.005	0.005	0.03	0.2		
PbSb4	余量	3.5～4.5	0.001 5	0.005	0.008	0.01	0.06	0.005	0.005	0.03	0.2		
PbSb6	余量	5.0～7.0	0.01	0.01	0.01	0.015	0.08	0.01	0.01	0.05	0.3		
PbSb8	余量	7.2～9.2	0.02	0.01	0.01	0.015	0.08	0.01	0.01	0.05	0.3		
PbSb12①	余量	10.0～14.0	0.02	0.01	0.01	0.015	0.08	0.01	0.01	0.05	0.3	管、棒、线	

注：1. 经供需方协议，PbSb0.5中锑含量可为0.40%～0.80%；
2. YB909用PbSb3.5（Pb-（3.0～4.5）%Sb，杂质：Sn+Cu≤0.5%）生产箔材，用于电气、仪表等工业。
① 非部标产品。

4.3 硬铅和特硬铅

变形硬铅和特硬铅的牌号、成分和用途见表6.2-26和表6.2-27。

4.4 变形 Pb - Ca - Sn 合金

变形 Pb - Ca 合金的力学性能与热处理的关系见图6.2-33。变形 Pb - Ca - Sn 合金成分与力学性能关系见表6.2-28。变形 Pb - Ca - Sn 合金可热处理强化，变形和热处理联合使用除能提高强度外，还可提高耐蚀性能及控制产生细晶粒的合金。可用这种合金材料连续加工铅酸电池栅极（扩孔或冲孔）、高强度护套和铜电解提纯的阳极。

表6.2-26 硬铅合金牌号、成分及用途

牌号	化学成分/%											产品类别	用途举例
	主要成分				杂质 ≤								
	Sb	Cu	Sn	Pb	Ag	As	Bi	Fe	Zn	Ca + Na	总和		
PbSb4 - 0.2 - 0.5	3.5 ~ 4.5	0.05 ~ 0.2	0.05 ~ 0.5	余量	0.02	0.015	0.08	0.01	0.01	0.05	0.30	板、带、管、棒	化学纤维等
PbSb6 - 0.2 - 0.5	5.5 ~ 6.5	0.05 ~ 0.2	0.05 ~ 0.5	余量	0.02	0.015	0.08	0.01	0.01	0.05	0.30	板、带、管、棒	工业作耐酸
PbSb8 - 0.2 - 0.5	7.5 ~ 8.5	0.05 ~ 0.2	0.05 ~ 0.5	余量	0.02	0.015	0.08	0.01	0.01	0.05	0.30	板、带、管、棒及铸件	耐蚀材料
PbSb10 - 0.2 - 0.5	9.5 ~ 10.5	0.05 ~ 0.2	0.05 ~ 0.5	余量	0.02	0.015	0.08	0.01	0.01	0.05	0.30	铸件	

表6.2-27 特硬铅合金的牌号、成分及用途

牌号	化学成分/%													产品类别	用途举例
	主要成分						杂质 ≤								
	Sb	Cu	Ag	Te	Se	Pb	Sn	Bi	As	Fe	Zn	Ca + Na	总和		
PbSb0.5 - 0.1	—	0.1 ~ 0.5	0.01 ~ 0.1	0.04 ~ 0.1	0.01 ~ 0.05	余量	0.002	0.03	0.003	0.003	0.002	0.05	0.3	板、带、管、棒	维尼龙等工业中用作耐蚀材料
PbSb0.5 - 2	—	0.1 ~ 0.5	0.01 ~ 2.0	0.04 ~ 0.1	0.01 ~ 0.05	余量	0.002	0.03	0.003	0.003	0.002	0.05	0.3		
PbSb2 - 0.1 - 0.5	1.5 ~ 2.5	0.05 ~ 0.2	0.01 ~ 0.5	0.04 ~ 0.1	0.01 ~ 0.05	余量	0.01	0.08	0.015	0.01	0.01	0.05	0.3		
PbSb4 - 0.1 - 0.5	3.5 ~ 4.5	0.05 ~ 0.2	0.01 ~ 0.5	0.04 ~ 0.1	0.01 ~ 0.05	余量	0.01	0.08	0.015	0.01	0.01	0.05	0.3		
PbSb6 - 0.1 - 0.5	5.5 ~ 6.5	0.05 ~ 0.2	0.01 ~ 0.5	0.04 ~ 0.1	0.01 ~ 0.05	余量	0.01	0.08	0.015	0.01	0.01	0.05	0.3		
PbSb8 - 0.1 - 0.5	7.5 ~ 8.5	0.05 ~ 0.2	0.01 ~ 0.5	0.04 ~ 0.1	0.01 ~ 0.05	余量	0.01	0.08	0.015	0.01	0.01	0.05	0.03		

表6.2-28 变形 Pb - Ca - Sn 合金力学性能

项目	合金				
	1	2	3	4	5
w_{Ca}/%	0.04	0.06	0.06	0.06	0.06
w_{Sn}/%	0.50	0.70	1.0	1.5	1.0
轧前时效/d	0	0	0	0	0
抗拉强度/MPa	53.5	64.3	72.8	78.5	35.7
伸长率/%	20.0	15.0	14.0	12.0	35.0
应力断裂（27.7 MPa）/h	12.0	75.0	400.0	1000.0	12.0

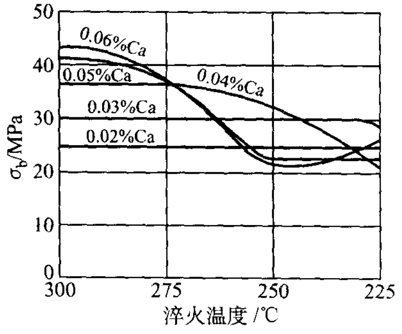


图6.2-33 铅 - 钙合金在不同温度淬火下储存10 d的强度

应提醒，时效必须是在加工变形之后进行。若在变形加工之前进行，由于产生不连续沉淀而使力学性能降低。

Pb - Ca - Sn 合金中添加少量 Bi 能提高硬化速度和抗钝化性。加 Ag 能明显地提高蠕变抗力，还能提高腐蚀层的导电性，减弱了钝化。加 Al 能减少 Ca 的损失，细化晶粒。

4.5 变形 Pb - Ag 合金

铅阳极板化学成分见表6.2-29。

表6.2-29 铅阳极板化学成分（摘自 GB/T 1471—1988）

牌号	主成分/%		杂质/% ≤								
	Pb	Ag	Cu	Sb	As	Sn	Bi	Fe	Zn	Mg + Ca + Na	总和
PbAg1	余量	0.8 ~ 1.2	0.001	0.004	0.002	0.002	0.006	0.002	0.001	0.003	0.02

变形 Pb - Ag 合金牌号、成分和用途见表6.2-30。

表 6.2-30 铅-银合金的牌号、成分及用途

牌号	化学成分/%												产品类别	用途举例
	主要成分		杂质 ≤											
	Ag	Pb	Cu	Sb	Sn	As	Bi	Mg	Zn	Fe	Ca + Na	总和		
PbAg0.6	0.5~0.7	余量	0.001	0.005	0.002	0.002	0.03	0.005	0.002	0.003	0.002	0.05	板、管、线板、管、线线	电解用耐酸、耐蚀、材料和高温焊料
PbAg1	0.8~1.2	余量	0.001	0.005	0.002	0.002	0.03	0.005	0.002	0.003	0.002	0.05		
PbAg2.5	2~3	余量	0.001	0.005	0.002	0.002	0.03	0.005	0.002	0.003	0.002	0.05		

5 蓄电池用铅合金

随着交通运输、能源电力、邮电通讯以及军事工业的发展，铅蓄电池应用量越来越大，生产铅蓄电池技术水平日新月异。铅及铅合金在蓄电池中所占比例为60%~70%，蓄电池品质好坏，铅及铅合金的作用不言而喻。

目前，铅蓄电池按使用性能大致可分四种。

1）普通蓄电池　铅合金中含锑量为3%~9%。这种蓄电池析气量大，需经常维护，其使用寿命为1~2年。价格便宜，容易生产。工业发达国家在淘汰，我国也开始生产新品种。

2）少维护蓄电池　这是免维护初级产品，铅合金中含锑量为2%~4%，析气量较小，其使用寿命为2~3年。在使用过程中需加1~2次水，失水量为免维护蓄电池的上限(6 g/(A·h))。这种蓄电池兼顾了产品性能和价格的要求。

3）免维护蓄电池　铅合金中含锑量在2%以下，正栅极用低锑或微锑铅合金，负栅极为无锑铅合金。以汽车用蓄电池为例，行驶300 000 km后，在汽车大修前才有可能加水维护，使用寿命在4年以上。其缺点是价格比较高。

4）全密闭蓄电池　除免维护外，任意翻动也不影响其电气性能，不漏电解液。全用无锑铅合金，失水量和自放电极小，其寿命能用5年以上。

各类蓄电池栅极合金性能比较参见表6.2-31。

栅板制造方法，有重力铸造法、扩展拉伸法、冲压法、连续铸造法和压力铸造法。

扩展拉伸法是将铅合金轧成板带，经过轧制、冲裁、扩展拉伸成为有一定尺寸的铅合金网状带，再经过焊极耳、切制等工序将其制成各种网格的栅极（板栅），类似钢板网。连续铸造法是将铅合金浇注到转动的滚筒弧面上，滚筒上是刻着板栅图案的滚压模具，滚筒转动板栅冷凝后剥离，连续不断的生产。其他方法众所周知。

蓄电池铅合金的成分和力学性能参见表6.2-32。

蓄电池用纯铅中杂质含量各国都有标准，见表6.2-33。

目前，高锑蓄电池用铅合金基本不用或用的很少了。关于中锑、低锑、微锑或无锑蓄电池用铅合金成分参见表6.2-34~表6.2-37。

表 6.2-31 板栅合金性能比较

铅合金	铸造工艺性能	导电性能	抗腐蚀性能	自放电性能	循环寿命	免维护性能	经济性
4%~6%Sb	良好	差	中等	差	良好	差	中等
1.5%~3.5%Sb	中等 良好	中等	中等	中等	中等 良好	中等	良好
0.7%~1.5%Sb	中等	良好	中等 良好	中等 良好	中等	中等 良好	中等 良好
锡-低锑	中等	良好	良好	良好	中等	中等	中等
Ca-Sn-Al	良好	良好	良好	良好	中等	良好	良好
锻造铅钙合金	良好	良好	良好	良好	中等 良好	良好	良好

表 6.2-32 铅合金的成分与力学性能

合金成分（余者为铅）/%	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度 HB	弯断次数/次
纯铅	12~25	30~50	4.02~4.20	3
0.8Sb	25.8	—	4.89	3
0.5Sb	50.4	22	14	1
1.8Sb 0.2As	50.9	8.3	14.4	0
1.8Sb 0.2As①	44.9	—	14.5	0
1.8Sb 0.2As 0.05 REM②	50.4	—	14	3
0.1Ca 0.3Sn	40~43	25~35	10.5	1
0.1Ca 0.6Sn	43.7	20~30	11.5	2
0.1Ca 0.3Sn 0.03Al	40~42	25~35	—	2
0.11Sr 0.2Sn 0.02Al	53	15	—	—

① 加有复合添加剂。
② 混合稀土金属。

表 6.2-33　电池用的纯铅中微量杂质的各国标准

元素	DIN1719 Germany	UN13165 Italy	ASTM B29－93 US	99.95 Australia	HP2 Canada	BS334 UK
Ag	0.001	0.001 5	0.002 5	0.002	0.001 5	0.002
As	0.001	0.002	0.000 5	0.002	0.001 5	trace
Bi	0.010	0.010	0.025	0.050	0.005	0.005
Cu	0.001	0.001 5	0.001	0.002	0.001 5	0.003
Fe	0.001	0.002 5	0.001	0.002	0.002	0.003
Ni	—	—	0.000 2	0.002	—	—
Sb	0.001	0.003 5	0.000 5	0.002	0.001 5	0.002
Sn	0.001	0.001	0.000 5	0.002	0.001 5	trace
Te	—	—	0.000 1	—	—	—
Zn	0.001	0.002	0.000 5	0.002	0.001	0.002
Cd	—	0.001	0.000 5	0.002	—	微量

表 6.2-34　中锑合金配方

合金配方编号	铅合金成分/%								
	Sb	Sn	As	Se	Cu	S	Al	Bi	Cd
1	2.8～3.2	0.15～0.25	0.1～0.2	0.02～0.03	0.03～0.05	0.002～0.004	—	—	—
2	2.75～3.25	0.50～0.35	0.1～0.2	0	0.01～0.03	≤0.001	—	—	—
3	2.75～3.25	0.04～0.08	0.04～0.08	0.02～0.12	≤0.005	≤0.001	—	—	—
4	2.8	0.15	0.10	0.01	0.05	0.005	0.01	—	—
5	2.8	0.15	0.10	0.03	0.05	0.005	0.01	—	—
6	2.4	0.03	0.09	0.02	0.07	0.005	—	0.01	—
7	2.56	—	0.14	—	—	—	—	—	—
8	2.8	0.05	—	—	0.02	—	—	0.015	0.4
9	2.8	0.15	0.12	—	0.02	—	—	0.015	0.2
10	2.7	0.16	—	—	—	—	—	0.015	0.2
11	2.76	0.04	0.15	—	0.04	—	—	0.008	—
12	2.68	0.04	0.20	—	0.04	—	—	0.06	—
13	2.75	0.35	0.40	—	0.075	0.005	—	0.02	—
14	3.00	0.30	0.15	—	0.04	0.002	—	0.02	—
15	2.35	—	0.19	—	—	—	—	—	0.2
16	2.35	—	0.19	—	—	—	—	—	0.5
17	2.35	—	0.19	—	—	—	—	—	1.0
18	2.35	—	0.19	—	—	—	—	—	2.0

表 6.2-35　低锑合金配方

合金配方编号	铅合金成分/%								
	Sb	Sn	As	Se	Cu	S	Al	Na	Cd
1	1.6～1.8	0.08～0.10	0.15～0.20	0.030	0.06～0.08	—	—	—	—
2	1.5～1.7	0.2～0.3	0.15～0.25	0.02～0.03	0.03～0.06	0.002～0.004	—	—	—
3	1.0～2.5	0.2～0.3	0.10～0.20	0.02～0.04	≤0.03	≤0.003	—	—	—
4	1.7	0.152	0.12	0.050	0.05	0.005	—	—	—
5	1.8	0.15	0.23	0.034	0.045	0.004	—	—	—
6	1.90	0.20	0.20	0.022	0.05	0.003	—	—	—
7	1.7	0.25	0.22	0.050	0.05	0.004	0.01	—	—

续表 6.2-35

合金配方编号	铅合金成分/%								
	Sb	Sn	As	Se	Cu	S	Al	Na	Cd
8	1.8	0.05	0	0.050	0.05	0.005	0.01	—	—
9	1.78	0.05	0	0.048	0.05	0.005	0.014	0.037	—
10	1.78	0.05	0	0.048	0.05	0.005	0.014	0.019	—
11	1.8	0.15	0.15	0.035	0.04	0.004	—	0.05	—
12	1.8	0.05	—	0.048	0.05	0.005	—	—	0.025
13	1.8	0.15	0.23	—	0.045	0.02~0.04	—	—	0.1
14	1.76	0.06	—	0.045	0.045	0.037	—	—	—
15	1.75	0.06	—	0.044	0.087	0.037	—	—	—
16	1.73	0.27	—	0.041	0.087	0.036	—	—	—
17	1.8	0.15	0.23	—	0.045	0.004	—	—	—

合金配方编号	铅合金成分/%									
	Sb	Sn	As	Se	Cu	S	F	Mg	Ti	Cd
18	1.8	0.05	—	0.076	0.05	0.005	0.06~0.13	—	—	—
19	1.8	0.15	0.23	—	0.045	0.004	0.13	—	—	—
20	1.8	0.16	0.23	—	0.045	0.004	—	0.056	0.11	—
21	1.8	0.05	—	0.05	0.05	0.005	(Ag) 0.05~0.25	—	—	—
22	2~4	0.5	(Co) 适量	—	—	—	—	—	—	1.5~2.0
23	1~2	—	—	—	—	—	(Ag) 0.1~0.15	—	—	—
24	2~4	—	0.1~0.15	—	(Te) 适量	—	Ag 0.006~0.012	—	—	—
25	0.8~1.6	0.2~0.5	0.08~0.16	0.000 5	0.05	0.005	—	—	—	—
26	1~3	0.2~0.3	0.01~0.02	—	—	—	—	—	—	—
27	1.0~3.5	0.005~0.1	0.015~0.2	—	0.02~0.06	0.003~0.008	—	—	—	—
28	1.8~3.5	0.005~0.1	0.015~0.2	0.010~0.025	0.05~0.06	—	—	—	—	—

表 6.2-36　微锑合金配方

合金配方编号	铅合金成分/%									
	Sb	Sn	As	Se	Cu	S	Ag	Cd	Na	REM
1	0.80	0.25	0.15	—	0.08~0.1	—	—	—	—	0.30
2	0.80	0.25	0.15~0.20	0.02~0.03	0.06~0.08	0.005	—	—	—	—
3	0.75~0.80	0.25~0.35	0.20~0.25	0.025~0.030	0.03~0.05	0.002~0.004	—	—	—	—
4	0.80	0.020~0.05	0.08	—	—	—	0.006~0.0120	—	—	—
5	0.80	0.25	0.15~0.20	0.02~0.03	0.06~0.08	0.005	—	—	—	—
6	0.2~1.0	(Li或K或Na的一种)(添加量0.11~0.4)								
7	0.35	1.8	—	0.05	—	—	—	—	—	—
8	0.30	—	—	—	—	—	—	0.30	—	—
9	0.50	—	—	—	—	—	—	0.50	—	—
10	1.00	—	—	—	—	—	—	1.0	—	—
11	0.80	0.24	—	—	0.05	—	—	—	0.05	—
12	1.00	0.15	—	—	0.14	—	—	—	0.05	—
13	0.80	0.07	0.07	0.02	0.023	0.002	(Mo)↓	(C)↓ 0.02	(Ti)↓ 0.008	0.06
14	0.80	0.07	0.07	0.02	0.023	0.002	0.06	0.02	0.008	0.06
15	0.80	0.07	0.07	0.02	0.023	0.023	0.002	0.02	0.008	0.06

表 6.2-37 无锑合金配方

合金配方编号	合金成分/%								
	Ca	Sn	Al	Bi	Na	Mg	Zn	REM	Ag
1	0.1	0.6	0.02	—	—	—	—	—	—
2	0.08~0.15	0.2~0.5	0.02~0.04	—	—	—	—	—	—
3	0.08~0.15	0	0.02~0.04	—	—	—	—	—	—
4	0.09	0	—	0.02	—	—	—	—	0.03
5	0.095	0.5	—	0.02	—	—	—	—	0.03
6	0.095	0.9	—	0.02	—	—	—	—	0.03
7	0.08~0.15	0.2~0.5	0.02~0.04	0.2~0.5	—	—	—	—	—
8	0.10	0.6	0.02	0.2[1]	—	—	—	—	—
9	0.10	0.6	0.02	—	0.01	—	—	—	—
10	0.10	0.3	0.05	—	0.077	—	—	—	—
11	0.085	0.4~0.7	0.005~0.01	—	—	0.005~0.1	—	—	—
12	0.1	1.2	0.06	0.05	—	0.03	—	—	0.04
13	0.1	0.4	0.01	0.05	—	0.03	—	—	0.012
14	0.11	0.02	0.01	—	—	0.01~0.06	—	—	—
15	0.15	2.0	—	—	—	—	0.5	—	—
16	0.05	—	—	—	—	—	—	0.08	0.01

合金配方编号	合金成分/%									
	Ca	Sn	Al	Cd	REM	Bi	Mg	Li	Sr	Ag
17	0.03~0.12	0.1~1.5	0.05~0.1	0.1~2	—	—	—	—	—	—
18	0.085	0.4~0.7	0.005~0.01	—	—	—	0.085~0.1	0.01~0.03	—	—
19	0.03~0.04	0.15~0.9	—	—	—	—	—	(Ba) 0.025~0.07	0.15~0.4	—
20	—	20~75	—	70~20	—	70~20	—	—	—	—
21	—	—	0.02~0.05	—	—	—	—	—	0.08~0.56	—
22	—	0.13	0.02	—	—	—	—	—	0.15	—
23	—	0.05~1.0	—	(Co) 0.05~0.1	—	—	—	—	—	3~5
24	—	—	—	(As) 0.1~0.15	(Te) 0.1~0.3	—	—	—	—	0.1~0.5
25	0.1	—	—	(As) 0.009	(Te) 适量	—	—	—	—	0.008
26	0.03~0.12	0.1~0.5	0.05~0.1	0.1~2	—	—	—	—	0.1~1.5	—
27	0.03~0.04	0.15~0.9	—	—	—	—	—	(Ba) 0.025~0.07	0.15~0.3	—
28	0.01~0.02	0.05~2.0	0.01~0.2	—	(Tl) 0.01~2.0	—	—	—	—	—
29	—	0.5	—	0.1~2	—	(As) 0.1~1.5	—	—	—	—
30	—	0.05~0.5	—	—	—	—	—	0.003	—	—

6 铅及其合金生产知识基础

6.1 熔炼与铸造

(1) 熔炼与铸造

铅及其合金熔点低，密度大，气体在熔体中无明显的溶解度，因而熔炼工艺较简单。熔炼主要在燃油、燃气或电加热炉中进行，焦炭炉熔炼已少见。所用坩埚以铸铁或钢的为主，也有用石墨或黏土坩埚等。大批量熔炼浇注时，采用铅泵抽取、虹吸或坩埚底部放出进行浇注。

铅合金配料原则与其他金属合金相同。加入元素熔点较低而且易与铅熔合的，如锑与镉等，按成分要求和生产实际配料，直接向铅液中加入即可。若所加合金元素熔点较高（如铜、镍、锌、银和钙等等）或者虽然熔点较低易生成高熔点化合物或易挥发易氧化的元素（如硒、砷及碱金属等），最好先制成中间合金然后再以中间合金方式加入为好。

铅合金铸造，除浇注零件外，铸造加工用锭坯时，铸模材料可用金属型、硬型，单个铸造或用连续铸造机铸造。水平连续铸造或铸轧工艺已开发应用。挤压管、棒材时，可将液体铅或铅合金浇注到挤压筒内，凝固后挤压，可以连续不断地挤出制品。

纯铅铸造温度为360℃左右。Pb-Sb合金根据加入元素对合金熔点影响，适当调节铸造温度。

(2) 铸造缺陷

铅合金铸造缺陷，常见的有冷裂、热裂、形状不全等。

冷裂一般指铸件凝固后，由于应力超过合金抗拉强度而断裂。断口呈金属色，无氧化现象。如板栅，出铸型后是完整无缺的，放置一段时间出现裂纹。其原因主要是合金中偏析大，各相分布不均；含有过量的杂质，或凝固时间短，凝固温度低等。解决办法是对合金进行变质处理、净化处理和加强搅拌。引人注意的是添加合金凝固时膨胀的金属，如铑、锑等。在合金凝固时收缩，有这些金属存在起膨胀作用，减小内应力，消除宏观裂纹的产生。

热裂是在铸件凝固过程中产生的，裂纹表面有氧化，金相组织粗大，在放置过程中不再扩展。解决办法是对合金进行变质处理，变质剂与低熔金属形成高熔点化合物，以利快速凝固。再者可细化枝晶网胞，分解凝固时的收缩力。

浇注不全是铸造不成完整零件。这是因为浇注温度过低、合金黏度大、铸型温度低、合金流动性差所至。解决办法是适当提高浇注温度和铸型预热温度，改进铸型充型条件等。

铅锑合金中含锑量对铸造性能的影响见图6.2-34。铅锑合金共晶反应，熔点低，流动性好。由图6.2-34可知，在含5%~13%Sb时，铸造性能随含锑量增加而越来越好。这是因为合金中共晶体含量多少造成的，而且共晶体组织致密，晶粒细小，铸件内应力小，品质好是人所共知的。合金中含1%~3%Sb时裂纹严重。图6.2-34中指出，该成分合金正处在固溶体组织。成分不均；杂质超量会集中在晶界上，晶界抗拉强度低，铸造性能较差，应力集中容易造成开裂。含3%~5%Sb时，结晶温度间隔大，铸造性能差，也是易产生热裂的合金。含锑1%以下，类似纯铅，铸造性能好，但力学性能差。

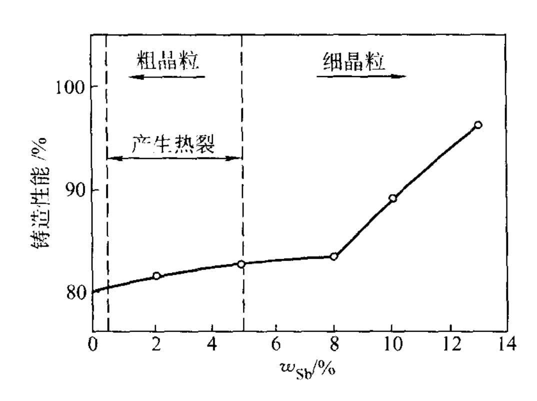


图6.2-34 合金中含锑量与铸造性能的关系

浇铸温度500℃，模具温度150~175℃

6.2 精铅熔铸时配制铅合金

在铅冶炼厂，利用精炼铅的铅液体直接配制铅合金是个方向，它可以节省能源消耗，还可以确保合金品质的优良程度。因为减少一次重熔过程。

其关键技术是严格控制生产过程。

为了提高Pb-Sb合金的硬度，可以添加As、Sn、Cu和Se等元素。当Pb-Sb合金凝固时容易发生树枝状粗大晶粒时，为防止这种现象发生，可以加入S、Se、Cu等元素，增加非自发核心。在配制Pb-Sb合金时，不同成分的合金应严格控制不同的作业温度。

为了防止Pb-Ca合金Ca的损失（烧损），向合金中加入少量（如0.015%）的铝，可保护钙不被烧损。有铝存在还能细化晶粒。

6.3 铅合金的塑性加工

铅及铅合金加工材是指通过轧制、挤压及拉拔等压力加工方法，生产板、带、条、箔、管、棒、线等产品。

铅极其柔软，延展性好，再结晶温度在室温以下，易于成形，而且无加工硬化现象。与其他金属材料相比较，铅及铅合金加工材生产无特殊困难。其加工原理和方法参见本卷第2篇第5章。

7 铅的废品回收与再利用

铅的生产，其产量中有限大部分是由废料生产的。据资料介绍，2001年美国和德国再生铅占铅总产量约60%，日本约40%。我国1995年再生铅产量为17.5万吨，占总产量的约30%。

再生铅生产有两种类型，一类是废铅料与矿铅原料搭配处理；另一类是废铅由专业厂处理，熔炼成铅产品市场销售。

铅废料主要来自铅蓄电池、废铅板、铅管、废电缆铅护套、废印刷合金以及铅渣等等，其中铅蓄电池占70%~90%。我国各种铅废料构成，废铅蓄电池占70%左右，废铅板、管占约8%，废铅锑合金占15%左右，废电缆铅护套占4%等。

再生铅原料处理方法，根据废铅原料组成，可采用坩埚炉、反射炉、鼓风炉、SB炉、长短回转窑和电炉等设备进行火法熔炼，得到再生精铅或铅合金。也可与原生铅的冶炼搭配处理。原料中含有比较多的铅化合物时，还可用湿法处理生产电铅或铅化工产品。

铅合金生产和再生铅生产都会造成严重的环境污染。铅及其化合物对人和哺乳动物都有毒性。铅白、铅的氧化物、碱性硫酸铅容易溶解，粒子小，易成粉状，毒性较大。硅酸铅、铬酸铅、硫化铅溶解度低，毒性较小。此外，铅化合物的剂量和侵入途径也是决定毒性的重要因素。铅中毒可出现贫血、周围神经病、中毒性脑病、肾病、腹绞痛、肝病和高血压等。

熔炼铅合金和铅废料再生过程中应进行污染治理。关于管理和治理国家都有具体规定，从事与铅生产相关工作，需查阅国家文件，应严格执行。

铅及铅合金废料、废件分类和技术条件见GB/T 13588—1992。

编写：田荣璋（中南大学）
审稿：唐仁政（中南大学）

第3章 锡及其合金

1 概述

1.1 锡的资源与锡的冶炼

锡是最古老的金属之一，5000年前就已被人类所利用。但是，它是地壳表层中较少的又是普通的元素，比铅、锌和铜稀少得多，在地壳岩石圈中锡的丰度（平均值）约为2×10^{-6}。自然界的锡以氧化物和多种硫化物存在，最常见的是SnO_2（锡石），另外有$Cu_2S\cdot FeS\cdot SnS_2$（黄锡矿）、$PbSnS_2$（硫锡铅矿）、$PbSn_4FeSbS_{14}$（圆柱锡矿）和AgSnSb（黑硫银锡矿）。

我国有悠久的炼锡历史，最早主要是炼制锡青铜。唐山出土的铜耳环，距今已4000余年。商代已达到分别炼出铜和锡然后配制合金的高级阶段。河南安阳发现商朝晚期的锡块和外镀厚锡层的虎面铜盔，可证明我国至迟在公元前1200年左右已掌握了炼锡技术。目前我国锡冶炼技术居世界先进水平。

1.1.1 锡矿资源

世界锡储量　根据美国矿业局1995年发表的《矿产品概览》资料，目前全世界的锡储量基础约为1 000万吨，储量为700万吨。世界及主要国家锡储量见表6.3-1（50万吨以上的国家）。

表6.3-1　世界锡储量及储量基础　　万吨

国　家	储　量	占比例/%	储量基础	占比例/%
中国	160	21.5	160	15.8
巴西	120	16.1	250	24.7
马来西亚	120	16.1	120	11.8
泰国	94	12.6	94	9.3
印度尼西亚	75	10.0	82	8.1
扎伊尔	51	6.9	51	4.9
玻利维亚	45	6.0	90	8.9
澳大利亚	21	2.8	60	5.9
世界总计	700	—	1 000	—

中国锡储量　我国锡矿资源丰富，已探明储量居世界前列，其特点是分布集中，以原生脉锡矿为主，原生矿以亲硫系列矿床为主。主要分布在云南个旧、广西大厂、广西平桂、云南都龙等矿区。

1.1.2 锡的冶炼

工业上由锡石生产锡是用碳在1 200~1 300℃下的反射炉或鼓风炉或电炉中进行还原，得到粗锡，再经过火法或电解法精炼获得精锡。处理锡原料提取锡的各种方案见图6.3-1。

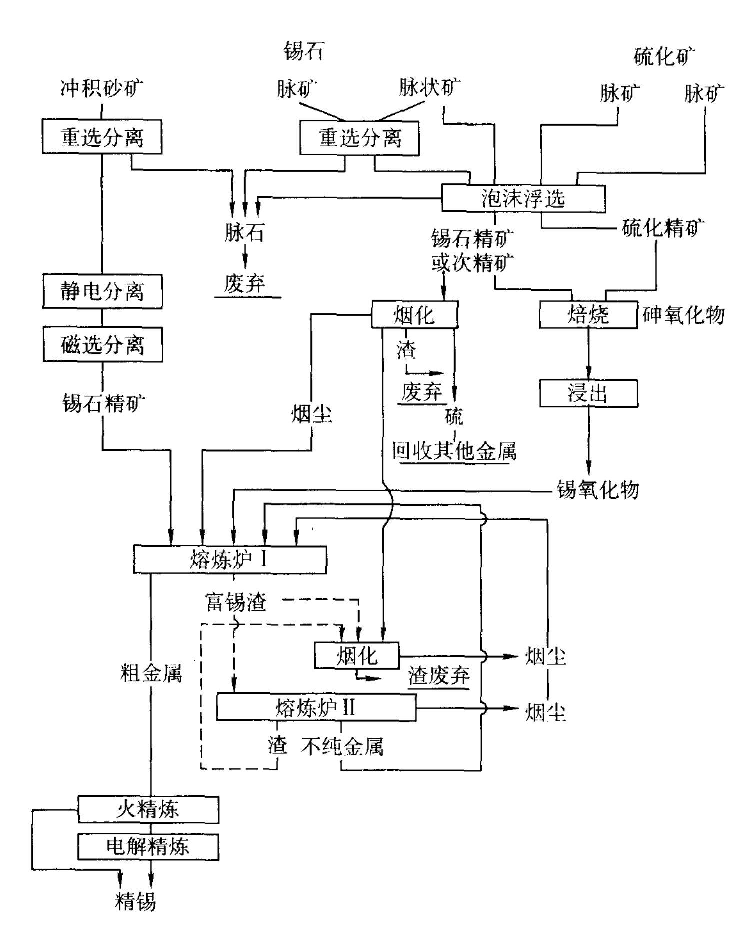


图6.3-1　处理锡原料提取锡的各种方案

精锡的化学成分见表6.3-2。

表 6.3-2 锡锭化学成分（摘自GB/T 728—1998）

牌号			Sn99.90	Sn99.95	Sn99.99
化学成分/%	Sn ≥		99.90	99.95	99.99
	杂质 ≤	As	0.008	0.003	0.000 5
		Fe	0.007	0.004	0.002 5
		Cu	0.008	0.004	0.000 5
		Pb	0.040	0.010	0.003 5
		Bi	0.015	0.006	0.002 5
		Sb	0.020	0.014	0.002
		Cd	0.000 8	0.000 5	0.000 3
		Zn	0.001	0.000 8	0.000 5
		Al	0.001	0.000 8	0.000 5
		总和	0.10	0.050	0.010

1.2 锡的生产量与消费量

世界锡产量见表6.3-3。

表 6.3-3 世界锡总产量　　万吨

年份	2000年	2001年	2002年	2003年
产量	26.36	27.02	27.35	26.8

中国锡产量见表6.3-4。

表 6.3-4 中国锡产量　　万吨

年份	2000年	2001年	2002年	2003年
产量	11.24	10.50	9.61	10

世界锡消费量见表6.3-5。

表 6.3-5 世界锡消费量　　万吨

年份	2000年	2001年	2002年	2003年
消费量	27.59	28.06	27.42	29.3

中国锡消费量见表6.3-6。

表 6.3-6 中国锡消费量　　万吨

年份	2000年	2001年	2002年	2003年
消费量	5.16	6.20	5.65	6.1

我国经济的快速发展，尤其是电子工业、汽车工业的快速增长，对锡的消费保持着强劲的势头，主要表现在焊锡行业的发展上。焊锡是我国锡的消费大户。据统计焊锡企业产量在1 000 t/a以上的有20多家，其中产量在3 000 t/a以上的有7家，如潮阳西南焊料厂年产4 320 t，南海安臣焊料厂年产4 000 t，深忆铖达年产3 500 t，东莞千岛年产3 300 t，云南爱法年产3 200 t，东莞粤城和绍兴天龙都年产3 000 t。国内已有200余家生产焊料企业，总产量超过60 000 t/a，消费锡量在35 000 t以上。随着无锡焊料的推广应用，精锡消费还会进一步增长。

锡的消费用于生产马口铁、焊料、合金和化学制品，其消费所占比例见表6.3-7。

我国锡的出口贸易，2002年精锡及加工材都有所降低，这是受到我国“锡加工材出口需要配额”政策的限制及加入WTO后关税降低进口增加的缘故。

2002年精锡及加工材进出口情况见表6.3-8。

表 6.3-7 锡的用途占消费比例　　%

用途	1983年	1988年	1993年	1995年
钢板镀锡	36	31	27	29
焊料和易熔合金	29	31	33	32
化学制品	10	13	15	16
其他合金	25	25	25	23

表 6.3-8 2002年精锡和加工材进出口情况

品名	精锡	巴氏合金	焊锡	加工材	锡制品	箔粉	合计	折合精锡
进口量/t	3 627	156	4 222	13 638	2 204	638	24 485	17 381
出口量/t	38 181	0	10 397	754	1 929	356	45 617	41 020
差额/t	28 554	-156	6 175	-12 884	-275	-282	21 132	23 639

2 锡及其合金的物理冶金基础

2.1 纯锡

2.1.1 物理性质

锡的物理性质见表6.3-9。

锡有10个自然存在的稳定同位素，有两个同素异形体白锡（β-Sn）和灰锡（α-Sn），同素异形转变温度为13℃。白锡软而灰锡脆，白锡向灰锡转变时发生膨胀，体积差大约27%，会使锡变成粉末，称为“锡疫”。锡接触灰锡会“传染”。没有诱发因素，白锡向灰锡转变是很慢的，即使在-40℃存在3年也不发生转变。白锡向灰锡转变其转变速度与锡纯度有关，高纯锡在低温下极易发生“锡疫”。Sb，Bi，Pb和Cd能阻碍这种转变，而Zn，Al，Mg，Co，Mn和Te等杂质则促进“锡疫”发生。

表 6.3-9 锡的主要物理性质

性质	数据	性质	数据
熔点/℃	231.96	比热容（18~20℃）/J·(g·K)$^{-1}$	0.243 6
沸点/℃	2 270	黏度（320℃）/Pa·s	0.001 593
密度/g·cm^{-3}（α-Sn，1℃）	5.765	表面张力（300~500℃）/N·cm^{-1}	(5.32~5.16)×10^3
（β-Sn，15℃）	7.298	线胀系数（50℃）/K^{-1}	23.1×10^{-6}
莫氏硬度	3.75	电阻率（18℃）/Ω·cm	11.5×10^{-6}
熔化潜热/J·g^{-1}	60.28	热导率（β-Sn，100℃）/W·(m·K)$^{-1}$	60.7
蒸发潜热/J·g^{-1}	3 018	超导转变温度/K	3.73

2.1.2 力学性质

锡的力学性质见表6.3-10。

表6.3-10 锡的力学性质

性 质	数 据	备注
弹性模量 E/MPa	41 500～47 800	—
切变模量 G/MPa	16 800～18 100	—
弹性极限 σ_e/MPa	1.5	—
屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	12	铸造的
抗拉强度 σ_b/MPa	19～21	铸造的
抗拉强度 σ_b/MPa	17	退火的
抗剪强度 σ_τ/MPa	20	铸造的
伸长率 δ/%	45～60	铸造的
伸长率/%	80～90	退火的
布氏硬度 HB	4.9～5.2	铸造的

温度对锡的力学性能影响见图6.3-2。

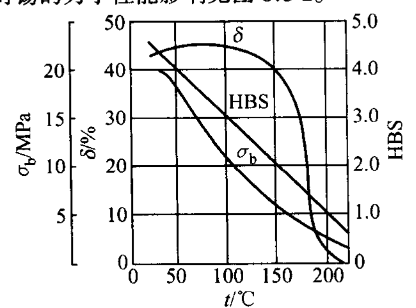


图6.3-2 锡在高温时力学性能的变化
原材料：加工后在50℃退火的条材

2.1.3 化学性质

锡化学本质是两性的，它与强酸和碱起反应，但能耐一般的中性溶液腐蚀，并且在许多弱酸、碱和中性溶液中有好的抗蚀性。在有氧和（或）氧化性盐的水溶液中能大大地增加腐蚀速度。锡不与许多气体发生反应，如氮、氢、二氧化碳或氨气，但很容易与卤素和潮湿的二氧化硫作用。

锡相对于铁是阴极，铁上镀锡可做阴极保护层。如果有未镀部分（如小孔），铁上就会出现点蚀。在有空气的酸性介质中，在铁锡的电化学匹配下，存在相反的电势，锡相对于铁又成了阳极。利用这种特性，锡做食物和饮料罐，锡优先腐蚀，获得锡盐防止铁腐蚀，锡盐无毒，保护了食物。

2.2 锡合金

锡合金二元相图按其特点可分成三组。

1）两组元不产生化合物，互相形成有限固溶体，发生共晶转变，如Sn－Pb，Sn－Bi，Sn－Al，Sn－Zn和Sn－Ga系等。这些合金共晶体熔点较低，是焊料及易熔合金的基础。

2）两组元形成化合物，锡和化合物发生共晶转变。

① 有些合金共晶成分靠近纯锡，如Sn－Fe，Sn－Co，Sn－Mn，Sn－Cu，Sn－As，Sn－Ni，Sn－Ti和Sn－Zr系等，其组织为在锡的基体上分布着化合物，找不出典型的亚共晶、共晶和过共晶组织，化合物能提高锡的强度和硬度。

② Sn－Au，Sn－Li，Sn－Mg和Sn－Ag系合金，为Sn和化合物构成的典型共晶体系合金，共晶体熔点低，流动性好。

3）两组元发生包晶反应，形成化合物，除Sn－Ca合金外，化合物在Sn中有较大的溶解度，对强化锡起较大的作用，如Sn－Sb，Sn－Cd，Sn－In和Sn－Ca系等。Sn－Sb合金β相（SbSn化合物）为块状，具有轴承合金所需要的典型组织。

对锡合金而言，固溶强化是有效手段，但只有少数几种元素在锡中溶解，如锌、镉、铋最大溶解度低于2%，而锑和铟的最大溶解度也不过为6%～7%，因此这种办法受到限制。这些元素对锡硬度的影响见图6.3-3。由图可知，多种合金元素联合使用效果更好，如Sn－1Ca－9Sb合金。

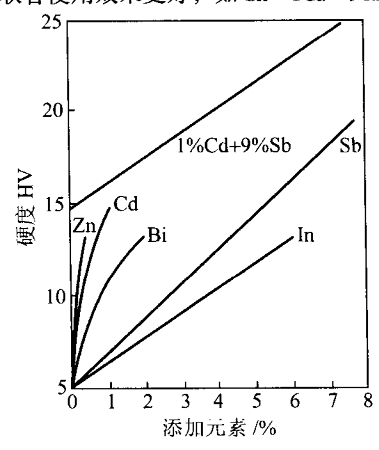


图6.3-3 溶质含量对锡基固溶体硬度的影响

第二相强化，如Ni_3Sn_4，$FeSn_2$，Cu_6Sn_5和SbSn金属间化合物在锡固溶体基体中分布强化效果明显。淬火时效强化靠金属间化合物固溶后沉淀，Sn－（1%～2%）Cd－（9%～14%）Sb合金最为有效。这些合金在铸造时激冷会形成过饱和固溶体，在100～140℃时效，如SbSn或CdSn金属间化合物沉淀产生强化。

利用冷加工硬化办法供锡合金强化是困难的，因为锡及其合金在冷加工量超过20%时，随着冷加工量的增加会产生自发再结晶，出现加工软化现象，这是锡合金冷加工特点，应当注意，见图6.3-4。

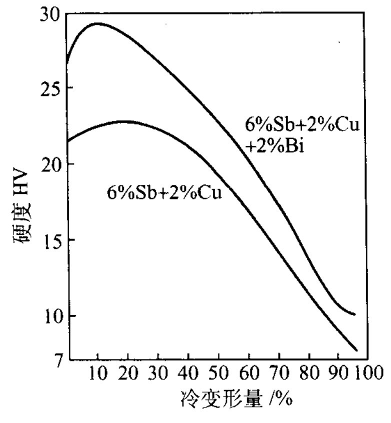


图6.3-4 冷轧对两种锡合金硬度的影响

3 锡及其合金成分、性能与用途

锡最重要的特点是熔点低，能与很多金属形成合金，无毒，耐腐蚀，具有良好的塑性和美丽的外观。因此用来生产马口铁、锡焊料、轴承合金、易熔合金和各种锡器合金。

3.1 纯锡

纯锡在少数很特殊的应用场合中使。锡箔用来制作电容器，锡丝制作熔断器和安全栓，锡管、筒子以及锡衬里的容器用来输送和储存蒸馏水、碳酸饮料、啤酒和葡萄酒。

锡产量的近三分之一用来生产镀锡钢板（马口铁），镀锡层厚度为1 μm到几微米之间，或以每平方米上有多少克锡（g/m²）来表示，如11.2 g/m²表示锡的厚度为1.54 μm。

镀锡钢板分热镀锡和电镀锡，详细内容请参阅材料表面工程卷相关章节。

用锡锭轧制锡箔，厚度可轧到0.004 mm。用于食品的，锡箔中不能含铅。加工纯锡的化学成分及用途见表6.3-11。

3.2 锡合金

锡合金中主要用于生产焊料，可占锡消费量的30%，其中75%用于电子工业。另外的用途是制造轴承合金和易熔合金。关于锡焊料、锡基轴承合金和易熔合金，请参见本卷第6篇第4章相关内容。

锡合金箔材的化学成分及用途见表6.3-12。

表6.3-11　加工纯锡的化学成分及用途

锡品号	代号	化学成分（质量分数）/%									用　途
		Sn	杂质≤								
		≥	As	Fe	Cu	Pb	Bi	Sb	S	总和	
一号锡	Sn1	99.90	0.015	0.007	0.01	0.05	0.015	0.015	0.001	0.10	制成板、箔材，用于电气、仪表等工业制造零件
二号锡	Sn2	99.75	0.02	0.01	0.03	0.08	0.05	0.05	0.01	0.25	
三号锡	Sn3	99.56	0.02	0.02	0.03	0.30	0.05	0.05	0.01	0.44	
四号锡	Sn4	99.00	0.01	0.05	0.10	0.66	0.06	0.15	0.02	1.00	

表6.3-12　锡合金箔材的化学成分及用途

合金牌号	代号	化学成分（质量分数）/%				用　途
		主要成分			杂质≤	
		Sn	Pb	Sb	Cu	
2.5锡锑合金	SnSb2.5	余量	—	1.9~3.1	0.5	用于电气、仪表等工业制造零件
13.5-2.5锡铅合金	SnPb13.5-2.5	余量	12.0~15.0	1.75~3.25	铅+铜0.5	

锡器合金是含锡超过90%的合金，典型成分为92%Sn-（6%~7%）Sb-（1%~2%）Cu，不能含Pb，就是杂质也尽量限制Pb的含量，因为Pb有毒。广泛用这种合金制造器皿，如酒壶、高脚杯、碟盘、烛台、徽章、饰物以及各种工艺品。锡器合金表面抛光或进行化学处理，光亮美观。此外还有很多已报道过的锡基合金。锡是重要的合金元素，含锡的合金约近百种。

4　锡的废料回收与再利用

锡在地壳中平均含量仅为2×10^{-6}，虽然用量不大，但用途广泛，是社会进步和科技发展不可或缺的。废锡回收再利用势在必行，而且成本较低。

再生锡的利用大体上可分成三类：再生纯锡、高锡合金再利用和低锡合金的再利用。因此，再生锡中有很大比例是以合格的合金形式出售和使用。

再生锡的原料主要有以下几个方面提供。

1）马口铁（镀锡钢板）废料　目前，马口铁锡镀层通常为2.8~15 g/m²，含锡量为马口铁的0.46%~0.52%。我国1997年年消费镀锡钢板60~70万吨，国内锡再生资源由此可见一般。

2）各类含锡合金废料　青铜和黄铜中的锡是再生锡的最大来源。青铜和黄铜废料可重熔调整成分，又以成品青铜和黄铜使用。另外，在熔炼时锡进入烟尘和炉渣中，再经过冶炼过程生产出金属锡或合金。

3）废焊料、轴承合金及锡合金　通过分检和再熔炼，使其成为有用成品合金销售，其熔渣作冶炼厂原料。

4）合金厂或再生金属厂的含锡渣　这是冶炼厂的良好原料。

编写：田荣璋（中南大学）
审稿：唐仁政（中南大学）

第4章　轴承合金、焊料及易熔合金

1　铅基和锡基轴承合金

1.1　概述

滑动轴承与滚动轴承比较，具有承压面积大、工作平稳、无噪声以及装拆修理方便等一系列优点。

滑动轴承的结构一般由轴承体和轴瓦构成。轴瓦直接支撑转动的轴。为了提高轴瓦的强度和耐磨性，往往在钢质轴瓦的内侧浇铸或轧制一层耐磨合金，形成一层均匀的内衬。用来制造轴承内衬的耐磨合金、称为轴承合金。

轴与轴瓦（实际是与轴承合金）之间进行润滑，形成一层油膜，达到液体润滑摩擦。实际上，在启动、停车以及负荷变动时，润滑油膜往往遭到破坏，这时是半干摩擦甚至是干摩擦。因此，对轴承合金的组织和性能提出一定的要求。

1）在工作温度下具有足够的强度和硬度以及耐磨性，能承受较大的单位压力（载荷）和磨损。

2）有足够的塑性和韧性，保证与轴的良好配合和承受冲击和振动。

3）与轴之间的摩擦因数要小，并能保持住润滑油。

4）具有良好的磨合能力，以使载荷均匀分布。

5）具有良好的抗蚀性能和导热性能以及较小的热胀系数。

6）容易制造，价格低廉。

7）具有合理的金相组织。如图6.4-1所示，在软的基体组织上分布着硬质点（化合物），硬质点体积分数占15%～30%为佳。

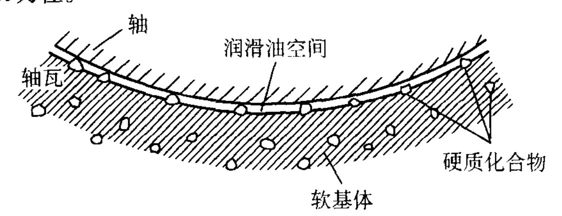


图6.4-1　轴承理想表面示意图

在机器开始工作以后，软基体很快被磨损而凹下，硬质点凸起。凹下的部分储存润滑油，保证良好的摩擦条件和较低的摩擦因数。软基体抗冲击、抗震还有较好的磨合能力。而硬质点则比较抗磨变成凸起孤岛状，支撑着轴所施加的压力。如果遇到有外来硬质点，在力的作用下可嵌在软基体之中，保证轴颈不被擦伤。能满足这些要求的材料多是铅或锡为基的轴承合金，一般称为“巴比特合金”或“巴氏合金”。

上述滑动轴承合金是在软基体中嵌镶硬质点，也有在硬基体中布满软质点的。滑动轴承合金有铅基和锡基的，也有铝基和铜基的。它们的性能比较见表6.4-1。

各种轴承合金的特点及用途见表6.4-2。

铅基轴承合金国内外牌号对照见表6.4-3。锡基轴承合金国内外牌号对照见表6.4-4。

表6.4-1　常用轴承合金的性能比较

种类	摩擦相容性	顺应性与嵌入性	抗疲劳性	耐蚀性	导热性	合金硬度 HB	轴颈最小硬度 HB	最大容许压力 [p] /MPa	最高容许温度 /℃
锡基合金	B	B	D	A	E	20～30	150	6～10	150
铅基合金	A	A	E	E	E	18～39	150	6～8	150
铜铅合金	C	D	C	D	B	25～60	200	20～32	250～280
锡青铜	C	E	A	B	C	60～90	200	7～20	280
铝青铜	E	E	B	A	D	100～110	280	15	300
黄铜	C	E	A	A	D	70～95	200	7～20	200
锌合金	E	E	C	A	C	80～105	200	20	80～120
铝基合金	C	C	B	A	A	22～32	200～280	20～28	150～170
三层金属轴瓦	A	B	B	B	B	—	200～300	14～35	170

注：A表示优；B表示良；C表示中；D表示较差；E表示差。

表6.4-2　各种轴承合金的特点及其应用

类　型	特　点	应　用
锡基轴承合金	具有较高的减摩性能、很好的嵌入性、摩擦顺应性和耐蚀性。强度、硬度和疲劳强度均较低	适用于汽车、拖拉机、汽轮机等高速轴承
铅基轴承合金	比锡基轴承合金便宜，耐磨性、强度和耐蚀性比锡基合金差，热胀系数比锡基合金大，工作温度稍高于锡基合金，其他性能与锡基轴承合金相似	适用于低速、低载荷或静载下工作的中载荷机械设备
铜铅合金	在高压和高速工作条件下具有较高的疲劳强度，与其他减摩合金相比，在冲击载荷下开裂倾向小，有高的导热性，优越的亲油性、减摩性和耐磨性，但摩擦顺应性、嵌入性比锡基或铅基轴承合金差	适用于高速、高载荷的轴承，例如：航空发动机、大马力柴油机、拖拉机等发动机曲轴连杆轴承
铝基轴承合金	密度小，导热性好，承载能力大，疲劳强度高，抗咬合性好，有较高的高温硬度，优良的耐蚀性和耐磨性。但摩擦因数较大，要求轴颈有较高的硬度	用于高速高载荷机械设备，也用铸造铝锡合金制造一般机床轴套

续表 6.4-2

类型	特点	应用
锡青铜	疲劳强度较高，耐磨性、减磨性和耐蚀性很好。和锡基或铅基轴承合金相比，表面性能较差，要求轴颈有较高的硬度	用于低速中等载荷或受冲击的轴承，例如：减速器、起重机电动机和泵的一般轴承
铝青铜	强度和硬度最高，耐蚀、耐磨、价格便宜。缺点和锡青铜类似，表面性能较差，要求轴颈有较高的硬度	用于润滑充分的低速重载荷或受冲击载荷的轴承，例如：减速器、破碎机、压力机的轴承
黄铜	疲劳强度高，耐蚀性较好，容易加工，价格便宜。减摩性和耐磨性比青铜差	用于低速中等载荷的轴承，例如：运输机械、挖掘机的整体轴承

表 6.4-3 铅基轴承合金国内外牌号对照表

中国 GB/T 1174—1992	相近牌号					
	国际标准	俄罗斯	美国	日本	德国	英国
ZPbSb16Sn16Cu2	—	Б16	—	—	—	—
ZPbSb15Sn5Cu3Cd2	—	Б6	—	—	—	—
ZPbSb15Sn10	PbSb15Sn10	—	UNS - 53581	WJ7	WM10	BS3332 - E
ZPbSb15Sn5	—	—	UNS - 53565	—	WM5	BS3332 - G
ZPbSb10Sn6	PbSb10Sn6	—	UNS - 53546	WJ9	—	BS3332 - F

表 6.4-4 锡基轴承合金国内外牌号对照表

中国 GB/T 1174—1992	相近牌号						
	国际标准	俄罗斯	美国	日本	德国	英国	法国
ZSnSb12Pb10Cu4	—	—	—	WJ4	—	—	—
ZSnSb11Cu6	—	Б83	—	—	—	—	—
ZSnSb8Cu4	SnSb8Cu4	Б89	UNS - 55193	WJ1	LgSn89	BS3332 - A	—
ZSnSb4Cu4	—	Б91	UNS - 55191	—	—	—	—
ZSnSb12Cu6Cd1	—	—	—	—	—	—	J9A - W

1.2 铅基轴承合金

1.2.1 铅基轴承合金物理冶金基础

铅基轴承合金一般是以 Pb - Sb 合金为基础，Sb 对 Pb 性能影响见表 6.4-5。因为 Pb - Sb 合金属共晶类型（见图 6.2-10），取过共晶（超过 11.2%Sb）合金，其组织为硬相 β + 共晶体（α + β）。这种组织基本能满足轴承合金的要求，在软的基体（即共晶体）中有硬质点（β 相）分布。但是，铅的密度（11.34 g/cm^3）比 Sb 的密度（6.68 g/cm^3）大得多，重力偏析严重，故二元 Pb - Sb 合金的性能和组织均不适用。为了提高合金的性能和组织均匀性，必须加入其他合金元素。

为了提高 Pb - Sb 合金的强度、硬度和耐磨性，通常加入 6% ~ 16%Sn。Sn 能溶于 Pb 形成含 Sn 的 α 固溶体，提高 α 固溶体的强度、硬度，又能与 Sb 形成金属间化合物 SnSb 硬质点相，提高合金的耐磨性。Sn 还能改善合金的耐蚀性和合金与铜的结合强度。

为了防止合金组织中重力偏析，加入 1% ~ 2% Cu，Cu 和 Sb 形成金属间化合物 Cu_2Sb，熔点高，先结晶，晶体呈树枝状，在合金凝固时防（阻）止 SnSb 相上浮造成的重力偏析，SnSb 相在合金中分布均匀（见图 6.4-2）。Cu_2Sb 相还能提高合金的耐磨性。如果向铅基轴承合金中加入少量的 Ni，Te 或 As，Cd 或 Ca 等元素，可改善组织和进一步提高合金的性能（见图 6.4-3）。

表 6.4-5 锑含量对铅锑二元合金力学性能的影响

化学成分/%		抗拉强度	伸长率	硬度
Pb	Sb	σ_b/MPa	δ_5/%	HB
100	0	13.7	47	4.2
99	1	23.0	38	7.0
96	4	38.6	22	10
94	6	46.9	24	12
92	8	51.0	19	15
88	12	56.0	—	13

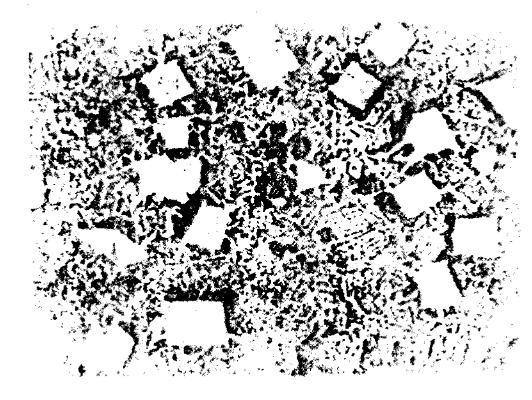


图 6.4-2 ZPbSb15Sn10 合金的显微组织（250×）

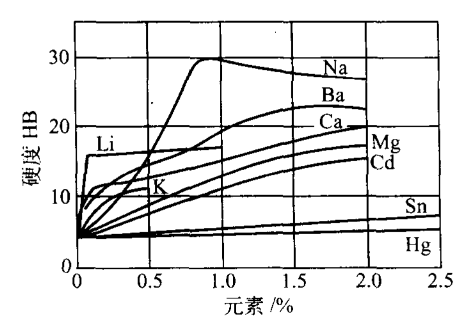


图 6.4-3　一些添加元素对铅的硬度的影响

Pb 与 Ca 形成 $CaPb_3$ 金属间化合物。Ca 在 Pb 中几乎不溶解。Pb 和 $CaPb_3$ 是共晶反应，共晶成分接近 Pb，熔点约 326.2℃。$CaPb_3$ 以较硬质点存在 Pb 基体中，可提 Pb 的耐磨性。一般 Pb - Ca 系轴承合金中还加有 Na，Pb - Na 合金二元相图见图 6.4-4。Na 在 Pb 中的溶解度最大时（共晶温度 307℃）为 1.5%Na，室温约为 0.4%Na，溶解度随温度变化而改变。Na 与 Pb 形成 Na_2Pb_5 中间相，可见该系合金能通过热处理提高其力学性能。

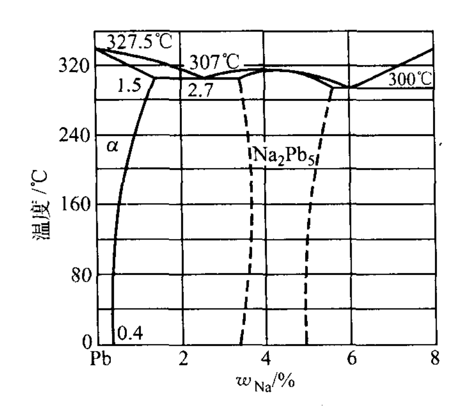


图 6.4-4　Pb - Na 系状态图

1.2.2　铅基轴承合金成分和性能

铅基轴承合金分两类：即 Pb - Sb 系合金和 Pb - Ca 系合金。

（1）Pb - Sb 系轴承合金

1）牌号和成分　Pb - Sb 系轴承合金牌号和化学成分见表 6.4-6。Pb - Sb 系轴承合金锭牌号和化学成分见表 6.4-7。

表 6.4-6　铅锑轴承合金的牌号、化学成分（摘自 GB/T 1174—1992）

合金牌号	化学成分/%										
	主要成分					杂质含量≤					
	Pb	Sb	Sn	Cu	Cd	Zn	Al	Fe	Bi	As	其他元素总和
ZPbSb16Sn16Cu2	其余	15.0 ~ 17.0	15.0 ~ 17.0	1.5 ~ 2.0	—	0.15	—	0.1	0.1	0.3	0.6
ZPbSb15Sn5Cu3Cd2	其余	14.0 ~ 16.0	5.0 ~ 6.0	2.5 ~ 3.0	1.75 ~ 2.25	0.15	—	0.1	0.1	0.6 ~ 1.0	0.4
ZPbSb15Sn10	其余	14.0 ~ 16.0	9.0 ~ 11.0	0.7①	≤0.05	0.005	0.005	0.1	0.1	0.6	0.45
ZPbSb15Sn5	其余	14.0 ~ 15.5	4.0 ~ 5.5	0.5 ~ 1.0	—	0.15	0.01	0.1	0.1	0.2	0.75
ZPbSb10Sn6	其余	9.0 ~ 11.0	5.0 ~ 7.0	0.7①	≤0.05	0.005	0.005	0.1	0.1	0.25	0.7

①　不计入其他元素总和。

表 6.4-7　铸造铅基轴承合金锭（GB/T 8740—1988）

合金牌号	化学成分（质量分数）/%													硬度① HB ≥
	主要成分						杂质含量 ≤							
	Sb	Cu	Sn	As	Cd	Pb	As	Fe	Zn	Bi	Cu	Al	总和	
ZChPbSbD16 - 1 - 1	14.5 ~ 17.5	—	0.8 ~ 1.2	0.8 ~ 1.4	—	余量	—	0.1	0.005	0.1	0.6②	0.005	0.3	21
ZCh PbSbD16 - 16 - 2	15.0 ~ 17.0	1.5 ~ 2.0	15.0 ~ 17.0	—	—	余量	0.1	0.08	0.05	0.1	—	0.01	0.4	30
ZChPbSbD15 - 11 - 2	14.0 ~ 16.0	1.0 ~ 2.0	9.0 ~ 12.0	—	—	余量	0.1	0.1	0.05	0.1	—	0.05	0.5	—
ZChPbSbD15 - 10	14.0 ~ 16.0	0.1 ~ 0.5	9.0 ~ 11.0	—	—	余量	0.2	0.1	0.05	0.1	—	0.005	0.5	24
ZChPbSbD15 - 5 - 3	14.0 ~ 16.0	2.5 ~ 3.0	5.0 ~ 6.0	0.6 ~ 1.0	1.8 ~ 2.3	余量	—	0.1	0.05	0.1	—	—	0.3	32
ZChPbSbD15 - 5	14.0 ~ 15.5	0.5 ~ 1.0	4.0 ~ 5.5	—	—	余量	0.2	0.1	0.05	0.1	—	0.01	0.5	20
ZChPbSbD14 - 5	14.0 ~ 15.0	0.1 ~ 0.5	4.0 ~ 6.0	—	—	余量	0.1	0.1	0.05	0.1	—	0.01	0.4	20 ~ 27
ZChPbSbD13 - 7 - 1	12.0 ~ 14.0	—	6.0 ~ 8.0	0.8 ~ 1.2	—	余量	—	0.1	0.05	0.1	0.5②	0.01	0.3	—
ZChPbSbD10 - 6	9.0 ~ 11.0	0.1 ~ 0.5	5.0 ~ 7.0	—	—	余量	0.1	0.1	0.05	0.1	—	0.01	0.4	18

①　铸锭的硬度值仅做参考，不做验收依据。

②　不计入杂质总和内。

2）性能　Pb - Sb 系轴承合金的物理性能见表 6.4-8。力学性能见表 6.4-9 和表 6.4-10。

表 6.4-8　铅锑轴承合金的物理性能

合金牌号	密度 ρ /g·cm^{-3}	线胀系数 α_l /10^{-6}K^{-1}	热导率 λ /W·(m·K)$^{-1}$	摩擦因数 μ	
				有润滑	无润滑
ZPbSb16Sn16Cu2	9.29	24.0	25.12	0.006	0.25
ZPbSb15Sn5Cu3Cd2	9.60	28.0	20.93	0.005	0.25
ZPbSb15Sn10	9.60	24.0	23.86	0.009	0.38
ZPbSb15Sn5	10.20	24.3	24.28	—	—
ZPbSb10Sn6	10.50	25.3	—	—	—

表 6.4-9　铅锑轴承合金的力学性能

性　　能	ZPbSb16-Sn16Cu2	ZPbSb-15Sn5-Cu3Cd2	ZPbSb15-Sn10	ZPbSb15-Sn5	ZPbSb10-Sn6
抗拉强度 σ_b/MPa	76.5	67	59	—	78.5
屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	—	—	57	—	—
伸长率 δ_5/%	0.2	0.2	1.8	0.2	5.5
抗压强度 σ_{bc}/MPa	121	133	125.5	108	—
抗压屈服强度 $\sigma_{-0.2}$/MPa	84	81	61	78.5	—
疲劳极限 σ_{-1}/MPa	22.5	—	27.5	17	25.5
弹性模量 E/GPa	—	—	29.4	9.4	29.0
冲击韧度 a_K/kJ·m^{-2}	13.70	14.70	43.15	—	46.10

续表 6.4-9

性能		ZPbSb16-Sn16Cu2	ZPbSb-15Sn5-Cu3Cd2	ZPbSb15-Sn10	ZPbSb15-Sn5	ZPbSb10-Sn6
硬度 HBS	17～20℃	34.0	32.0	26.0	20.0	23.7
	50℃	29.5	24.9	24.8	—	18.0
	70℃	22.8	21.3	22.1	—	—
	100℃	15.0	14.0	14.3	9.5	11.0
	125℃	6.9	12.1	—	—	—
	150℃	6.4	8.1	—	—	8.1

表 6.4-10 ZPbSb16Sn16Cu2 在不同温度下的力学性能

温度/℃	20	80	100	150	200
抗拉强度 σ_b/MPa	76.5	60	54	41	24.5
伸长率 δ_5/%	0.2	1.0	1.4	2.4	7.0

3）特点和用途 Pb－Sb 轴承合金的特点和用途见表 6.4-11。

（2）Pb－Ca 系轴承合金

1）牌号和成分 Pb－Ca 系轴承合金牌号和化学成分见表 6.4-12。

表 6.4-11 铅锑轴承合金的特点与应用

合金牌号	主要特点	应用
ZPbSb16Sn16Cu2	和 ZSnSb11Cu6 相比，抗压强度较高、价格较便宜，耐磨性较好，使用寿命较长。缺点是：塑性和冲击韧度较差，在室温下比较脆，经受冲击载荷时容易形成裂纹和剥落。承受静载荷时，情况较好	适用工作温度小于 120℃的条件下承受无显著冲击载荷的重载高速轴承，例如：汽车拖拉机的曲柄轴承和 800 kW 以上的蒸汽涡轮机，小于 750 kW 的电动机、小于 500 kW 的发电机、350 kW 以上的压缩机以及轧钢机等的轴承
ZPbSb15Sn5Cu3Cd2	和 ZPbSb16Sn16Cu2 相比，含锡量约低 2/3，但因加有镉和砷，性能无多大差别。可代替 ZPbSb16Sn16Cu2 合金	用于浇注汽车、拖拉机、船舶机械、小于 250 kW 的电动机、抽水机、球磨机和金属切削机床的轴承
ZPbSb15Sn10	冲击韧度高于 ZPbSb16Sn16Cu2，具有良好的嵌入性和摩擦顺应性，但摩擦因数较大	用于浇注中速中等载荷的轴承，如汽车、拖拉机发动机的曲轴和连杆轴承，也适用于高温轴承
ZPbSb15Sn5	为含锡量最低的铅锑合金。与 ZSnSb11Cu6 相比，抗压强度相当，但塑性和热导率较差。在温度不超过 80～100℃和冲击载荷较低的条件下，使用寿命不低于 ZSnSb11Cu6	用于低速中载荷的机械轴承。一般多用于矿山水泵轴承，也可用于汽轮机中等功率电动机、拖拉机发动机、空气压缩机等轴承和轴衬
ZPbSb10Sn6	为含铅量最高的铅锑合金，主要特点：强度与弹性模量的比值较大，抗疲劳能力较强；具有良好的嵌入性；合金硬度较低，对轴颈的磨损较小；软硬适中，韧性好，装配时容易刮削加工；原材料价廉，制造工艺简单，浇注品质容易保证。缺点是：合金本身的耐磨性和耐蚀性不如锡基轴承合金	可代替 ZSnSb4Cu4 用于工作温度不超过 120℃，承受中等载荷或高速低载荷的机械轴承。例如：汽车汽油发动机、高速转子发动机、空气压缩机、制冷机和高压液压泵等的主机轴承。也可用于金属切削机床、通风机、真空泵、离心泵、燃气泵、涡轮机和一般农机上的轴承

表 6.4-12 铅钙钠轴承合金的化学成分 %

类型	Ca	Na	Sn	Mg	Pb
无锡	0.85～1.15	0.6～0.9	—	—	其余
含锡	0.35～0.55	0.25～0.5	1.5～2.5	0.01～0.09	其余

2）性能 Pb－Ca 系轴承合金物理性能见表 6.4-13。力学性能见表 6.4-14。

表 6.4-13 无锡的铅钙钠轴承合金的物理与工艺性能

密度 ρ /g·cm^{-3}	线收缩率 /%	线胀系数 α_l /10^{-6}K^{-1}	热导率 λ /W·(m·K)$^{-1}$	摩擦因数 μ 有润滑	摩擦因数 μ 无润滑
10.5	0.75	32	20.93	0.004	0.44

表 6.4-14 铅钙钠轴承合金的力学性能

类别	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ_5/%	抗压强度 σ_{bc}/MPa	抗压屈服强度 $\sigma_{-0.2}$ /MPa	疲劳极限 σ_{-1} /MPa	硬度 HB	弹性模量 E/GPa	冲击韧度 a_K/ kJ·m^{-2}
无锡	98	2.5	157	116	25	32	22	78.45
含锡	91	8.1	148	80	—	17.5	—	114.70

3）特点和用途 Pb－Ca 系轴承合金的特点和用途见表 6.4-15。

表 6.4-15 铅钙钠轴承合金的主要特点与应用

类别	主要特点	应用
无锡的铅钙钠轴承合金	优点是具有较好的高温强度、冲击韧度和摩擦相容性，价格便宜。缺点是：线胀系数和摩擦因数较大，氧化倾向严重，熔炼工艺较复杂，耐磨性和耐蚀性较差	适用于低速重载和受冲击的轴承，如铁路客货车辆及机车的轴
含锡的铅钙钠轴承合金	和无锡的铅钙钠合金相比，钙和钠的含量较低，具有比较稳定的抗氧化和耐蚀能力。由于加入锡和镁，合金具有良好的耐磨性和强度。其他性能与无锡的铅钙钠合金相近	常用于制造 730 kW 内燃机车用的柴油机轴承和 880 kW 发动机轴承

1.3 锡基轴承合金

1.3.1 锡基轴承合金物理冶金基础

锡基轴承合金是以 Sn－Sb 合金为基础。Sb 在 Sn 中形成

以 Sn 为基础的 α 固溶体，Sn 在 Sb 中的 γ 固溶体及 β'（SnSb）金属间化合物。Sn－Sb 合金中含 Sb 大于 8%时（小于 50%），其组织为 α 固溶体＋β'（SnSb）相。β'相呈白色方块状，性硬而脆。在铸造凝固过程中，β'相上浮造成重力偏析，合金不好用。一般添加 Cu，形成 Sn－Sb－Cu 合金。加 Cu 形成针状或辐射状金属间化合物 Cu_3Sn 相，在凝固时先结晶，能阻止 β'相上浮，防止偏析，使 β'相分布均匀，见图 6.4-5 和图 6.4-6。

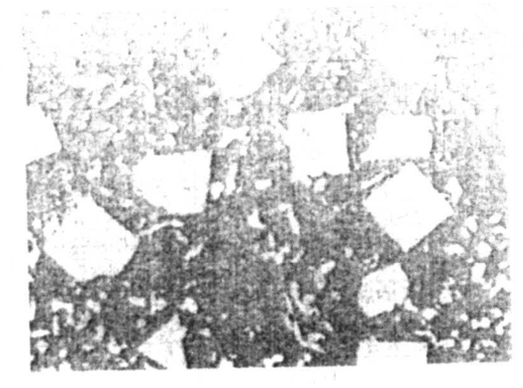


图 6.4-5 ZSnSb11Cu6 合金的显微组织（×100）



图 6.4-6 ZSnSb8Cu4 合金的显微组织（×100）

1.3.2 锡基轴承合金成分性能和用途

1）牌号和成分 锡基轴承合金的牌号和化学成分见表 6.4-16。锡基轴承合金锭的牌号和化学成分见表 6.4-17。

2）性能 锡基轴承合金的物理性能见表 6.4-18。力学性能见表 6.4-19。

ZSnSb11Cu6 合金和 ZSnSb8Cu4 合金在不同温度下的力学性能见表 6.4-20 和表 6.4-21。

3）特点和用途 锡基轴承合金的特点和用途见表 6.4-22。

表 6.4-16 锡基轴承合金的牌号和化学成分（摘自 GB/T 1174—1992）

合金牌号	化学成分（质量分数）/%											
	主要成分				杂质含量 ≤							
	Sn	Cu	Sb	Ni	Pb	Zn	Al	Fe	Bi	As	其他	其他元素总和
ZSnSb12Pb10Cu4	其余	2.5～5.0	11.0～13.0	—	9.0～11.0	0.01	0.01	0.1	0.08	0.1	—	0.55
ZSnSb12Cu6Cd1	其余	4.5～6.8	10.0～13.0	0.3～0.6	0.15	0.05	0.05	0.1	—	0.4～0.7	Cd1.1～1.6 Fe＋Al＋Zn ≤0.15	—
ZSnSb11Cu6	其余	5.5～6.5	10.0～12.0	—	0.35	0.01	0.01	0.1	0.03	0.1	—	0.55
ZSnSb8Cu4	其余	3.0～4.0	7.0～8.0	—	0.35	0.005	0.005	0.1	0.03	0.1	—	0.55
ZSnSb4Cu4	其余	4.0～5.0	4.0～5.0	—	0.35	0.01	0.01	—	0.03	0.1	—	0.55

表 6.4-17 铸造锡基轴承合金锭的牌号和化学成分（摘自 GB/T 8740—1988）

合 金 代 号	化学成分（质量分数）/%											硬度① HB≥
	主要成分				杂质含量 ≤							
	Sb	Cu	Pb	Sn	As	Pb	Fe	Zn	Bi	Al	总和	
ZChSnSbD 4－4	4.0～5.0	4.0～5.0	—	余量	0.1	0.35	0.06	0.008	0.08	0.005	0.6	20
ZChSnSbD 8－4	7.0～8.0	3.0～4.0	—	余量	0.1	0.35	0.06	0.008	0.08	0.005	0.6	24
ZChSnSbD 8－8	7.5～8.5	7.5～8.5	—	余量	0.1	0.35	0.08	0.008	0.08	0.005	0.6	27
ZChSnSbD 9－7	8.0～10.0	6.0～8.0	—	余量	0.1	0.35	0.1	0.01	0.1	0.01	0.65	—
ZChSnSbD 11－6	10.0～12.0	5.5～6.5	—	余量	0.05	0.35	0.08	0.008	0.05	0.005	0.5	27
ZChSnSbD 12－10－4	11.0～13.0	2.5～5.0	9.0～11.0	余量	0.1	—	0.08	0.008	0.08	0.01	0.3	29
ZChSnSbD 32－8－3	7.0～9.0	3.0～3.5	30.0～35.0	余量	0.1	—	0.1	0.01	0.08	0.01	0.4	15～20

① 铸锭的硬度值仅做参考，不做验收依据。

表 6.4-18 锡基轴承合金的物理性能

合金牌号	密度 ρ /g·cm^{-3}	线胀系数 α_l /10^{-6}K^{-1}	热导率 λ /W·(m·K)$^{-1}$	电导率 γ /(MS·m^{-1})	摩擦因数 μ	
					有润滑	无润滑
ZSnSb12Pb10Cu4	7.70	—	50.24	—	—	—
ZSnSb11Cu6	7.88	23.0	33.49	—	0.005	0.28
ZSnSb8Cu4	7.39	23.2	38.52	6.65	—	—
ZSnSb4Cu4	7.34	—	56.24	—	—	—

表 6.4-19 锡基轴承合金的力学性能

名称		ZSnSb12Pb10Cu4	ZSnSb11Cu6	ZSnSb8Cu4	ZSnSb4Cu4
抗拉强度 σ_b/MPa		83	88	78	63
屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa		38	66	61	29
伸长率 δ_5/%		—	6.0	18.6	7.0
面缩率 ψ/%		—	38	25	—
抗压强度 σ_{bc}/MPa		112	113	112	88
抗压屈服强度 $\sigma_{-0.2}$/MPa		37	80	42	29
疲劳极限 σ_{-1}/MPa		30	24	27	26
弹性模量 E/GPa		53	48	57	51
冲击韧度 a_K/kJ·m^{-2}	有缺口 a_{KV}	—	58.8	114.7	—
	无缺口 a_K	—	104.9	294.2	539.4
不同温度下硬度 HBS	17~20℃	24.5	30.0	24.3	22.0
	25℃	—	29.0	22.3	—
	50℃	—	22.8	18.2	16.4
	75℃	—	18.5	14.8	12.7
	100℃	12	14.5	11.3	9.2
	125℃	—	10.9	—	6.9
	150℃	—	8.2	6.4	6.4

表 6.4-20 ZSnSb11Cu6 合金在不同温度下的力学性能

温度 /℃	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ_5/%	断面收缩率 ψ/%	抗压强度 σ_{bc}/MPa	抗拉屈服强度 $\sigma_{-0.2}$/MPa	冲击韧度 a_K/kJ·m^{-2}
15	88	6.0	—	117	89	61.80
100	53	15.2	26.3	60	54	66.70
150	31	8.4	13.5	54	43	65.70

表 6.4-21 ZSnSb8Cu4 合金在不同温度下的力学性能

温度 /℃	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ_5/%	断面收缩率 ψ/%	温度 /℃	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ_5/%	断面收缩率 ψ/%
20	77	18	25	150	27	32	38
50	62	24	27	175	20	38	44
100	41	23	28				

表 6.4-22 锡基轴承合金的特点和应用

合金牌号	特点	用途
ZSnSb12Pb10Cu4	为含锡量最低的锡基轴承合金，价格便宜。特点是：软而韧、耐压。但因含铅而热强性较低	用于中速中等载荷的轴承，如一般机器的主轴承及电机轴承，不适用于高温部件
ZSnSb11Cu6	锡含量较低，铜和锑含量较高。特点是：强度和硬度较高，有良好的嵌入性、减磨性和耐磨性，线胀系数较小，但疲劳强度冲击韧度较低，故不能用于浇注薄层和承受较大振动载荷的轴承	它是工业中应用较广泛的轴承合金。用于重载荷高速工作温度低于 110℃ 的重要轴承，例如：1 400 kW以上的高速蒸汽机、360 kW 的涡轮压缩机和 880 kW 以上的发动机轴承

续表 6.4-22

合金牌号	特点	用途
ZSnSb8Cu4	和 ZSnSb11Cu6 相比，韧性较高，强度和硬度较低，其他性能相近；但由于含锡量较高，价格较贵	用于一般大型机器轴承及轴衬、高速重载汽车发动机主凸轮轴轴承、柴油机推力轴承和凸轮轴承
ZSnSb4Cu4	在锡基轴承合金中，该合金塑性和韧性最高、强度和硬度较低；由于含锡量最高，因而价格最贵	用于要求韧性较大和浇注层厚度较薄的重载荷高速轴承，例如：涡轮内燃机的高速轴承和轴衬、航空和汽车发动机的高速轴承
ZSnSb12Cu6Cd1	综合性能优越	大型汽轮发电机主轴轴瓦等

1.4 铅基和锡基轴瓦的熔铸工艺要点

1.4.1 轴承合金熔铸流程

铅基和锡基轴承合金强度较低，一般把它浇注在钢壳（背）上，制成双金属轴瓦。其生产流流程为：清洗钢壳与镀锡、轴承合金熔炼、浇注双金属轴瓦。轴承合金层越薄承载能力越大。

镀锡是为了使轴承合金与钢壳结合牢固。为了镀锡必须先把钢壳清洗干净。利用浸入法或涂抹法进行镀锡，使锡与铁形成 $FeSn_2$ 和 FeSn 金属间化合物过渡层。锡基轴承合金用纯锡，铅基轴承合金用 Sn－40%Pb 焊料做镀锡层。镀锡层应薄而均匀，因为镀锡层化合物性脆，锡在低温下（13℃以下）还有 β-Sn（白锡）→α-Sn（灰锡）相变，防止发生意外。

1.4.2 轴承合金熔炼工艺

熔炼设备可选用电炉、油炉或焦炭炉。

熔炼工艺基本参数见表 6.4-23 及表 6.4-24。

表 6.4-23 铅锑轴承合金的工艺性能

合金牌号	液相线温度 /℃	固相线温度 /℃	浇注温度范围 /℃	体收缩率 /%	流动性（螺旋线长度）/cm
ZPbSb16Sn16Cu2	410	240	450～470	—	54
ZPbSb15Sn5Cu3Cd2	416	232	450～470	—	—
ZPbSb15Sn10	268	240	380～400	2.3	—
ZPbSb15Sn5	380	237	450～470	2	—
ZPbSb10Sn6	256	240	380～400	2	—

为了保证产品品质和工作方便，最好选用轴承合金锭，重熔浇注。自己配制合金时，要控制杂质，不能超标。

自配合金熔炼工艺举例（工艺是多种多样的，仅为举例）：

表 6.4-24 锡基轴承合金的工艺性能

合金牌号	液相线温度 /℃	固相线温度 /℃	最合适浇注温度 /℃	线收缩率 /%	流动性（螺旋线长度）/cm
ZSnSb12Pb10Cu4	380	217	450	—	—
ZSnSb11Cu6	370	240	440	0.65	73
ZSnSb8Cu4	354	241	430	—	—
ZSnSb4Cu4	371	223	440	—	—

1）铅锑轴承合金熔炼工艺　将干燥木炭放在坩埚中，加热到 200℃左右，再将锡的一半和全部铜加入坩埚内，升温，全部熔化后，加入预热的锑，进行搅拌，锑熔化后扒渣，再加入剩余的锡，达到浇注温度后，静置一段时间精炼（可用 0.1%无水氯化铵），扒渣浇注。

2）铅钙轴承合金熔炼工艺　可购买 Pb－Na 和 Pb－Ca 中间合金。

自己熔制成品合金时，其工艺可选择如下：

先把 30%Pb 料熔化，然后把液态铅倒入盛金属钠的坩埚内，制成中间合金。如果不加 Pb－Ca 中间合金，可将 64%的氯化钙脱水并升温到 800℃，将氯化钙倒入 Pb－Na 中间合金熔液中，搅拌扒渣，加入剩余的铅，搅拌浇注。

3）锡基轴承合金熔炼工艺　将加有干燥木炭的坩埚预热到 200℃左右，再将一半锡和全部铜装入炉中升温，当全部熔化后加入预热的锑料，搅拌，等全部熔化后扒渣，最后加入剩余的锡。当合金液升温到浇注温度，静置一段时间，再进行精炼（用 0.1%无水氯化铵），扒渣浇注。

1.4.3 浇注轴瓦

轴瓦有整体圆筒形的、半圆形的和带材弯制成的。浇注方式有重力浇注、离心浇注和制双金属钢带的连续浇注。浇注方法、过程、特点及应用见表 6.4-25。

1.4.4 锡基和铅基轴承合金的铸造缺陷分析（表 6.4-26）

表 6.4-25 锡基和铅基轴承合金的浇注方法、过程、特点及应用

浇注方法	过程	特点	用途
重力浇注	固定已镀锡的钢壳，然后浇注轴承合金	工艺装备简单，易于投产，生产率较低	适用于单件小批量生产和制作大型轴承
离心铸造	将合金液浇注到正在旋转的钢壳中，以便在离心力作用下布满钢壳内表面而随之转动，最后凝固成双金属轴瓦	合金组织致密，力学性能较高，铸件无气孔夹渣等缺陷，节约金属，生产率高，容易产生偏析	适用于中小型轴瓦的成批和大批量生产
锡基、铅基合金双金属钢带连续浇注	将轴承合金液连续浇注在表面已经过清洗和镀锡的冷轧钢带上制成双金属带。双金属带经过退火处理后即可作为轴瓦材料	合金液连续快速冷却，合金组织致密，力学性能较好，黏结可靠，品质稳定，生产率高。但设备结构复杂，投产前一次投资较大	适用于轴瓦的大批量生产

表 6.4-26　锡基和铅基轴承合金的铸造缺陷分析

名称	特　征	产生原因	防止方法
与钢壳黏结不良	敲击时有破裂声音，撬开合金后，钢壳表面灰黑色无毛绒、或有白色块状锡层未与合金黏结	钢壳清洗不干净，镀锡温度过高，夹具预热不够，钢壳镀锡后未立即浇注合金，合金温度太低，合金浇注凝固后，冷却速度过快，金属间产生较大的收缩热应力	检查钢壳清洗和镀锡工艺，钢壳预热温度提高到400℃左右，夹具预热温度达到200℃以上，钢壳镀锡后立即浇注合金。检查合金的浇注温度，凝固后立即将轴瓦装入炉温为120～160℃保温炉内随炉冷却至室温
晶粒粗大	显微组织中晶粒和弥散相尺寸粗大	浇注温度过高，冷却速度太慢	调整合金浇注温度和加快冷却速度
成分偏析	合金层的内外层成分和组织不一致，显微组织中硬相化合物聚集在合金层外层	离心机转速太快，冷却速度太慢，合金液浇注温度过高	降低离心机转速，浇注前应将合金液搅拌均匀，合金液浇注温度不宜太高，一般在470℃以下，浇注后加快冷却速度
裂纹	轴瓦合金层表面或合金与钢壳交界处沿侧面的圆周方向有裂纹	锡基合金的钢壳镀锡时误用了焊锡，冷却不均匀并过快，离心机夹具松动、两端不同心，转动中有振动	锡基合金的钢壳镀锡时需用纯锡，调整冷却速度，检查冷却方式是否均匀合理，检修离心机和夹具
缩孔	合金层表面沿圆周方向或隐藏在表皮下层有细小的孔洞	冷却速度太慢，而浇注速度太快，合金层太薄，不能形成从外向内的顺序凝固	提高离心机转速，加快合金冷却速度，浇注后期浇注速度减慢，适当增加合金层厚度
气孔	合金表面或表面层有不规则分布的孔洞	熔炼温度过高，合金液过热，浇注温度过高或过低，冷却速度过快，夹具预热温度不够，预热不均匀	熔炼时要防止合金液过热。合金浇注温度要适当，不能过高或过低，调整冷却速度，夹具预热温度达200℃以上，浇注工艺要正确，防止浇注时卷入气体
夹渣	合金层表面或内部有非金属夹杂物	合金浇注温度过低，合金液净化不彻底，钢壳加热温度过高，加热时间过长，熔剂表面生成熔渣浮于表面	调整浇注温度和钢壳预热温度，合金液表面熔渣应扒净或用氯化铵进行精炼处理

2　锡铅焊料

2.1　概述

锡铅焊料属于软焊料。软焊料是相对硬焊料而言，软焊料熔点低，利用钎焊办法就可以在比较低的温度将其熔化并使需焊接的接头联接起来，提供连续导热和导电的一种方法，或者用于液体和气体容器密封。焊点不承受大的应力作用，如汽车散热器、制冷设备和各种储存器封装。

软焊料应该符合以下要求：

1）有一定的导热和导电能力；

2）在200℃以下能保持与联接件之间要求的强度；

3）组织致密，有好的密封性；

4）软焊料与被钎焊的零件及基体材料之间有好的润湿性。

软焊料的导热、导电性相当差，仅为铜的8%～15%。但是在导路中（如电路）并不显现有明显的阻力（如电阻），这是因为导路短，焊点处接触面积大的缘故。

焊接接头品质取决于需焊合的表面本性、软焊料性质和焊剂的选择。实际上是取决于熔融的软焊料对固态的需焊接的金属表面的润湿过程，建立冶金结合。

锡是许多软焊料组元中的活性元素，能与被焊接的基体金属如Cu，Fe和Ni等润湿和熔合（形成很薄的一层金属间化合物）。

使用焊剂是为了清洁需焊接的金属表面，避免影响润湿性。焊剂主要成分是$ZnCl_2$，有水时产生游离的盐酸（$ZnCl_2 + H_2O \longrightarrow Zn(OH)Cl + HCl$），钎接铜时，氧化层溶解为氯化物，离开基体铜，熔融的焊锡在铜上逐渐地铺开。

润湿性好坏往往用润湿角θ来表示，见图6.4-7，基体金属（M）和焊剂（F）之间、熔融焊料（S）和基体金属（M）之间以及熔融焊料（S）和焊剂（F）之间的界面的表面张力，相应界面的比界面能γ分别为γ_{MF}、γ_{SM}和γ_{SF}，其会交点三者应该平衡：

即　　$\gamma_{MF} = \gamma_{SF}\cos\theta + \gamma_{MS}$

θ为润湿角，随着θ角的减小，表示润湿性变好，也就是θ角越小，焊料基体金属上的铺展性越好。

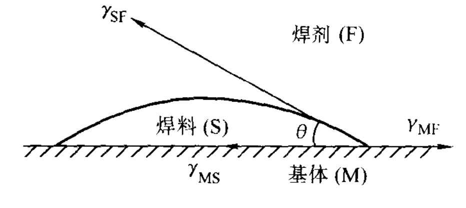


图 6.4-7　基体金属、焊料和焊剂保护层之间的界面张力示意图

2.2　软焊料成分、组织和性能

电子工业用软焊料一般为Sn－Pb系合金，共晶成分为26.1%Pb，共晶温度为183℃，可保证钎焊温度低，还损坏温度敏感的元件，通过控制合金成分来调节软焊料结晶温度间隔。

印刷电路板的成批钎焊，通常选用 Sn－40%Pb 的合金。手工钎焊时选用 Sn－50%Pb 的合金。这些合金的铸态显微组织是：初生的含锡铅基 β 固溶体＋共晶体。β 固溶体呈树枝状。由于随温度的降低，Sn 在 Pb 中的溶解度减小，Sn 析出，焊料软化。在 Sn－Pb－Sb 合金焊料中，由于析出 SnSb 金属间化合物尤为明显。

Sn－5%Ag 和 Sn－5%Sb 合金，不仅能使焊料强度保持到 200℃，还具有与共晶合金相似的润湿性。在低温下使用的焊料，应选高 Pb 合金，如 Pb－10%Sn 或 Pb－5%Sn－1.5%Ag 合金。这种合金的润湿性和强度受些影响，但不会在低温下（如 173 K）Sn 出现相变导致焊料塑性和冲击强度受到严重损失。

在这些软焊料中含 0.001%Al 就会引起氧化，氧化铝膜在液态焊料和焊剂界面上影响润湿性。在焊料中一般都含 0.1%～0.5%Sb，在抗蠕变焊料中可达到 5%Sb。含少量锑（0.1%～0.5%）能提高 Pb－Sn 焊料对铜及黄铜的润湿性。若加入 0.005%As，影响焊料对黄铜的润湿性，加入 0.1%～0.25%Bi，能提高共晶 Sn－Pb 焊料的铺展速度，超过 0.5% Bi 时焊料表面会变色。

镉会降低润湿速度，其氧化膜使焊料表面变暗，会引起钎接缺陷。铜对焊料润湿性影响不大，但超过 0.25%Cu 时，由于产生 Cu－Sn 化合物 η，影响钎焊表面外观。磷超过 0.01%P 影响焊料在铜和低碳钢上的润湿性，硫（S）影响钎焊表面外观，焊料中限定 S 含量在 0.001 5%之内。Zn 容易氧化产生氧化物，超过 0.003%Zn 时，焊料表面品质变坏。

各种杂质的联合作用不可低估，应给予严格限制。

2.3　锡铅焊料

锡铅焊料分为无焊剂芯（丝材、棒材、扁带、三角条）焊料和树脂芯（单芯、三芯、五芯和多芯）焊锡丝两大类。按照化学成分的含量，锡铅焊料的牌号分为 A、B 两级。压力加工方法制造的供电讯、电器、电力仪器、仪表及其他机械制造焊接用。

牌号中 HL 是汉语拼音焊料（hanliao）的字头，Sn 和 Pb 表示主成分，数字表示锡的大致含量，如 95A 锡铅焊料，牌号是 HLSn95PbA，即 A 级含 95%Sn 的锡铅焊料。

焊料中的杂质对其性能影响颇大，应严格限制。锌最为有害，含量达到 0.01%，流动性和润湿性下降，焊点外观受到影响。铝应限在 0.001%以下，因为铝会使流动性和润湿性下降，易氧化和腐蚀。镉降低熔点，焊料组织变粗，失去光泽，含量超过 0.001%会使流动性降低，焊点变脆。砷能提高流动性，但即使很少，也会影响外观，增加脆性。锑增加焊料电阻，铜使熔点升高。硫在焊点处常以腐蚀性产物形式残留在母材上，影响焊接、焊点美观和因此焊点处耐蚀性下降。

压力加工生产的锡铅焊料牌号和化学成分见表 6.4-27 和表 6.4-28。

铸造生产的锡铅焊料牌号和化学成分见表 6.4-29。

表 6.4-27　锡铅焊料牌号及化学成分（质量分数）（摘自 GB/T 3131—2001）

合金名称	牌号	主要成分/%				杂质/%≤								
		Sn	Pb	Sb	其他	Sb	Cu	Bi	As	Fe	S	Zn	Al	Ag
95A 锡铅焊料	HL95A	94～96	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.005	—
90A 锡铅焊料	HL90A	89～91	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
65A 锡铅焊料	HL65A	64～66	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
63A 锡铅焊料	HL63A	62～61	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
60A 锡铅焊料	HL60A	59～61	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
60A 锡铅锑焊料	HL60（Sb）A	59～61	余量	0.3～0.8	—	—	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
55A 锡铅焊料	HL55A	54～56	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
50A 锡铅焊料	HL50A	49～51	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
50A 锡铅锑焊料	HL50（Sb）A	49～51	余量	0.3～0.8	—	—	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
45A 锡铅焊料	HL45A	44～46	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
40A 锡铅焊料	HL40A	39～41	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
40A 锡铅锑焊料	HL40（Sb）A	39～41	余量	1.5～2.0	—	—	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
35A 锡铅焊料	HL35A	34～36	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
30A 锡铅焊料	HL30A	29～31	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
30A 锡铅锑焊料	HL30（Sb）A	29～31	余量	1.5～2.0	—	—	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
25A 锡铅锑焊料	HL25（Sb）A	24～26	余量	1.5～2.0	—	—	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
20A 锡铅焊料	HL20A	19～21	余量	—	—	—	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
18A 锡铅锑焊料	HL18（Sb）A	17～19	余量	1.5～2.0	—	—	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
10A 锡铅焊料	HL10A	9～11	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
5A 锡铅焊料	HL5A	4～6	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
4A 锡铅锑焊料	HL4（Sb）A	3～5	余量	5～6	—	—	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
2A 锡铅焊料	HL2A	1～3	余量	—	—	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
50－18A 锡铅镉焊料	HL50Cd18A	49～51	余量	—	Cd：17～19	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
5－1.5A 锡铅银焊料	HL5Ag1.5A	4～6	余量	—	Ag：1～2	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
63－2A 锡铅银焊料	HL63Ag2A	62～64	余量	—	Ag：1.5～2.5	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
38－4.5A 锡铅锌焊料	HL38Zn4.5A	37～39	余量	0.5～1.0	Zn：1～5 Cu：0.02～0.1	—	—	0.03	0.03	0.02	0.02	—	0.005	0.01
40A 抗氧化锡铅焊料	HLK40A	39～41	余量	1.5～2.0	P：0.001～0.004 Ga：0.001～0.004	—	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
60A 抗氧化锡铅焊料	HLK60A	59～61	余量	0.3～0.8	P：0.001～0.004 Ga：0.001～0.004	—	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—
“801”抗氧化锡铅焊料	HLK“801”A	61～62.5	余量	—	P：0.003～0.006 In：0.001～0.004	0.1	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	0.005	—

表 6.4-28 锡铅焊料牌号及化学成分（质量分数）（摘自 GB/T 3131—2001）

合金名称	牌号	主要成分/%				杂质/%≤								
		Sn	Pb	Sb	其他	Sb	Cu	Bi	As	Fe	S	Zn	Al	Ag
95B 锡铅焊料	HL95B	93.5 ~ 96	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
90B 锡铅焊料	HL90B	88.9 ~ 91	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
65B 锡铅焊料	HL65B	63.5 ~ 66	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
63B 锡铅焊料	HL63B	61.5 ~ 61	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
60B 锡铅焊料	HL60B	58.5 ~ 61	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
60B 锡铅锑焊料	HL60(Sb)B	58.5 ~ 61	余量	0.3 ~ 0.8	—	—	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
55B 锡铅焊料	HL55B	53.5 ~ 56	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
50B 锡铅焊料	HL50B	48.5 ~ 51	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
50B 锡铅锑焊料	HL50(Sb)B	48.5 ~ 51	余量	0.3 ~ 0.8	—	—	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
45B 锡铅焊料	HL45B	43.5 ~ 46	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
40B 锡铅焊料	HL45B	38.5 ~ 41	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
40B 锡铅焊料	HL40(Sb)B	38.5 ~ 41	余量	1.5 ~ 2.0	—	—	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
35B 锡铅焊料	HL35B	33.5 ~ 36	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
30B 锡铅焊料	HL30B	28.5 ~ 31	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
30B 锡铅锑焊料	HL30(Sb)B	28.5 ~ 31	余量	1.5 ~ 2.0	—	—	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
25B 锡铅锑焊料	HL25(Sb)B	23.5 ~ 26	余量	1.5 ~ 2.0	—	—	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
20B 锡铅焊料	HL20B	18.5 ~ 21	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
18B 锡铅锑焊料	HL18(Sb)B	16.5 ~ 19	余量	1.5 ~ 2.0	—	—	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
10B 锡铅锑焊料	HL10B	8.5 ~ 11	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
5B 锡铅焊料	HL5B	3.5 ~ 6	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
4B 锡铅锑焊料	HL4(Sb)B	2.5 ~ 5	余量	5 ~ 6	—	—	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
2B 锡铅焊料	HL2B	0.5 ~ 3	余量	—	—	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
50 - 18B 锡铅镉焊料	HL50Cd18B	48.5 ~ 51	余量	—	Cd：17 ~ 19	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
5 - 1.5B 锡铅银焊料	HL5Ag1.5B	3.5 ~ 6	余量	—	Ag：1 ~ 2	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
63 - 2B 锡铅银焊料	HL63Ag2B	61.5 ~ 64	余量	—	Ag：1.5 ~ 2.5	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
38 - 4.5B 锡铅锌焊料	HL38Zn4.5B	36.5 ~ 39	余量	0.5 ~ 1.0	Zn：4 ~ 5 Cu：0.02 ~ 0.1	—	—	0.08	0.05	0.02	0.02	—	0.005	0.01
40B 锡铅抗氧化焊料	HLK40B	38.5 ~ 41	余量	1.5 ~ 2.0	P：0.001 ~ 0.004 Ga：0.001 ~ 0.004	—	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
60B 锡铅抗氧化焊料	HLK60B	58.5 ~ 61	余量	0.3 ~ 0.8	P：0.001 ~ 0.004 Ga：0.001 ~ 0.004	—	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—
“801”锡铅抗氧化焊料	HLK“801”B	61 ~ 62.5	余量	—	P：0.003 ~ 0.006 In：0.001 ~ 0.004	0.3	0.05	0.08	0.05	0.02	0.02	0.002	0.005	—

表 6.4-29 铸造锡铅焊料牌号及化学成分（质量分数）（摘自 GB/T 8012—2000）

类别		牌号	代号	合金成分/%					杂质/%≤							
				Sn		Pb	Sb	其他	Bi	Fe	As	Cu	Zn	Al	备注	其他
				Ⅰ	Ⅱ											
锡铅焊料	含锑 C	ZHLSnPb60C	60C	59.5 ~ 61.0	59.5 ~ 61.0	余量	0.5 ~ 0.80	—	0.10	0.02	0.02	0.08	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb55C	55C	54.5 ~ 55.5	54.5 ~ 56.5	余量	0.12 ~ 0.80	—	0.10	0.02	0.02	0.08	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb50C	50C	49.5 ~ 50.5	49.5 ~ 51	余量	0.5 ~ 0.80	—	0.10	0.02	0.02	0.08	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb45C	45C	44.5 ~ 45.5	44.5 ~ 46.0	余量	0.5 ~ 0.80	—	0.10	0.02	0.02	0.08	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb40C	40C	39.5 ~ 40.5	39.5 ~ 41.0	余量	1.5 ~ 2.00	—	0.10	0.02	0.02	0.08	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb35C	35C	34.5 ~ 35.5	34.5 ~ 36	余量	1.5 ~ 2.00	—	0.10	0.02	0.02	0.08	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb30C	30C	29.5 ~ 30.5	29.5 ~ 31.0	余量	1.5 ~ 2.00	—	0.10	0.02	0.02	0.08	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb25C	25C	24.5 ~ 25.5	24.5 ~ 26.0	余量	0.2 ~ 1.50	—	0.10	0.02	0.02	0.08	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb20C	20C	19.5 ~ 20.5	19.5 ~ 21.0	余量	0.5 ~ 3.00	—	0.10	0.02	0.02	0.08	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb63B	63B	62.5 ~ 63.5	62.5 ~ 64.0	余量	0.12 ~ 0.50	—	0.05	0.02	0.02	0.05	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb60B	60B	59.5 ~ 60.5	59.5 ~ 61.0	余量	0.12 ~ 0.50	—	0.05	0.02	0.02	0.05	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb50B	50B	49.5 ~ 50.5	49.5 ~ 51.0	余量	0.12 ~ 0.50	—	0.08	0.02	0.02	0.05	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb45B	45B	44.5 ~ 45.5	44.5 ~ 46.0	余量	0.12 ~ 0.50	—	0.08	0.02	0.02	0.05	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb40B	40B	39.5 ~ 40.5	39.5 ~ 41.0	余量	0.12 ~ 0.50	—	0.08	0.02	0.02	0.05	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb35B	35B	34.5 ~ 35.5	34.5 ~ 36.0	余量	0.12 ~ 0.50	—	0.08	0.02	0.02	0.05	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb30B	30B	29.5 ~ 30.5	29.5 ~ 31.0	余量	0.12 ~ 0.50	—	0.08	0.02	0.02	0.05	0.002	0.002	—	0.08

续表 6.4-29

类别		牌 号	代号	合金成分/%					杂质/%≤							
				Sn		Pb	Sb	其他	Bi	Fe	As	Cu	Zn	Al	备注	其他
				Ⅰ	Ⅱ											
锡铅焊料	微锑A	ZHLSnPb90A	90A	89.5~90.5	89.5~91.0	余量	<0.12	—	0.08	0.02	0.01	0.05	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb70A	70A	69.5~70.5	69.5~71.0	余量	<0.12	—	0.08	0.02	0.01	0.05	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb63A	63A	62.5~63.5	62.5~64.0	余量	<0.12	—	0.03	0.02	0.01	0.05	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb60A	60A	59.5~60.5	59.5~61.0	余量	<0.12	—	0.03	0.02	0.01	0.05	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb55A	55A	54.5~55.5	54.5~56.0	余量	<0.12	—	0.08	0.02	0.01	0.05	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb50A	50A	49.5~50.5	49.5~51.0	余量	<0.12	—	0.08	0.02	0.01	0.05	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb45A	45A	44.5~45.5	44.5~46.0	余量	<0.12	—	0.08	0.02	0.01	0.05	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb40A	40A	39.5~40.5	39.5~41.0	余量	<0.12	—	0.08	0.02	0.01	0.05	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb35A	35A	34.5~35.5	34.5~36.0	余量	<0.12	—	0.08	0.02	0.01	0.05	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb30A	30A	29.5~30.5	29.5~31.0	余量	<0.12	—	0.08	0.02	0.01	0.05	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb2A	2A	1.5~2.5	1.5~2.5	余量	<0.12	—	0.08	0.02	0.01	0.05	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSn-Pb63AA	63AA	62.5~63.5	62.5~64.0	余量	<0.007	—	0.005	0.005	0.002	0.005	0.002	0.002	Cd0.002 S0.002	—
含银或磷的锡铅焊料	含银Ag	ZHLSnPb63Ag	63Ag	62.5~63.5	62.5~64.0	余量	<0.12	Ag1.3~1.5	0.08	0.02	0.01	0.05	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb60Ag	60Ag	59.5~60.5	59.5~61.0	余量	<0.12	Ag3~4	0.08	0.02	0.01	0.05	0.002	0.002	—	0.08
		ZHLSnPb50Ag	50Ag	49.5~50.5	49.5~51.0	余量	<0.12	Ag3~4	0.08	0.02	0.01	0.05	0.002	0.002	—	0.08
	含磷P	ZHLSnPb63P	63P	62.5~63.5	62.5~64.0	余量	<0.05	P0.001~0.004	0.05	0.01	0.01	0.01	—	—	Zn+Al+Cd 0.001	0.05
		ZHLSnPb60P	60P	59.5~60.5	59.5~61.0	余量	<0.05	P0.001~0.004	0.05	0.01	0.01	0.01	—	—	Zn+Al+Cd 0.001	0.05
		ZHLSnPb50P	50P	49.5~50.5	49.5~51.0	余量	<0.05	P0.001~0.004	0.05	0.01	0.01	0.01	—	—	Zn+Al+Cd 0.001	0.05
		ZHLSn-Pb60CuP	60CuP	59.5~60.5	59.5~61.0	余量	<0.05	P0.001~0.004 Cu0.1~0.2	0.05	0.01	0.01	—	—	—	Zn+Al+Ca0.001	0.05

锡铅焊料，无论是A级还是B级，都含铅。众所周知，铅有毒，对人身和环境都有害。焊料在加快向无铅方向发展。无铅焊料焊接正从实验室走进生产车间，世界范围的电子工业逐渐地在采用无铅焊料，如何从目前的锡铅焊接平稳地过渡到无铅焊接，还有各方面的相容性，也是非常重要的。

目前工业界主张在再流焊中用锡银铜合金，在波峰焊中采用锡银铜或锡铜合金。后者比前者便宜，是低价优选波峰焊焊料。无铅焊料料池温度比锡铅焊料的高，一般为255~270℃。对助焊剂、涂加方法和涂加量，预热温度和时间，都要研究确定。

锡铜焊料成分必须严格控制，铜成分改变0.2%，将引起熔化温度改变6℃，对生产会有很大影响。

无铅焊料有采用以下的成分：96.5%Sn于3.5%Ag；95.5%Sn+3.8%Ag+0.7%Cu；95.2%Sn+2.5%Ag+0.8%Cu+0.5%Sb。

3 易熔合金

3.1 概述

金属熔点与存在状态有关，一般指常温、常压和凝聚状态（如结晶块状）金属，在加热时由固态转变成液态，转变是在恒温下进行，这个转变温度叫熔点。

在60余种有色金属中，熔点最低的是汞（-38.83℃），熔点最高的是钨（3 400℃），在-38.83~3 400℃之间以哪种金属熔点为分界限，比它的熔点低的金属就是低熔点金属呢？一般以锡为分界限，熔点在231.9℃以下的金属均为低熔点金属，即有锂（Li）、钠（Na）、钾（K）、铷（Rb）、铯（Cs）、镓（Ga）、铟（In）、汞（Hg）和锡（Sn）等。低熔点金属物理性质见表6.4-30。

表6.4-30 低熔点金属的基本物理性质

金属	状态，室温颜色	熔点/℃	沸点/℃	密度(20℃)/g·cm⁻³	热导率(0~100℃)/W·(m·K)⁻¹	电导率(20℃)/μΩ·cm	线胀系数(0~100℃)/10⁻⁶K⁻¹	表面张力(液态)/mN·m⁻¹	黏度(液态)mPa·s
锂（Li）	固态，银白色	181	1 342	0.534	76.1	9.29	56	395	0.145 6
钠（Na）	固态，银白色	97.8	883	0.97	128	4.7	71	195	0.152 5
钾（K）	固态，银白色	63.2	759	0.86	104（s）	6.8	83	111	0.134 0
铷（Rb）	固态，银白色	38.8	688	1.53	58.3（s）	12.1	9.0	83	0.094 0
铯（Cs）	固态，银白色	28.5	670	1.87	36.1（s）	20	97	69	0.102 2
镓（Ga）	固态，灰白色	29.7	2 205	5.93	41.0（s）		18.3	718	0.435 9
铟（In）	固态，银白色	156.4	2 070	7.3	80.0	8.8	24.8	556	0.302 0
锡（Sn）	固态，银白色	231.9	2 625	5.75（灰）	73.2	12.6	23.5	544	0.538 2
汞（Hg）	液态，银白色	-38.83	357	13.546	8.65	95.9	61	498	0.556 5

熔化温度低于227℃（或231.9℃）的合金，熔化温度很有规律，每隔一段间距分开，适用面很宽，通常把这些合金称为易熔合金。

低熔点金属是生产易熔合金的基本原料，但是，生产易熔合金并不都是只用低熔点金属，经常用熔点比锡熔点高的一些金属，如Pb，Bi，Sb，Cd和Tl等。

表6.4-30中这些金属除生产易熔合金、做合金元素外，很少以它为基作结构材料，多以化合物形态应用，可以说都具有特殊用途。

3.2 易熔合金的物理冶金基础

研究合金的成分、组织和性质以及它们之间的关系，多以相图为依据。观察200多种以低熔点金属为基础形成的二元易熔合金相图，基本上可分为以下五个类型（见图6.4-8）。

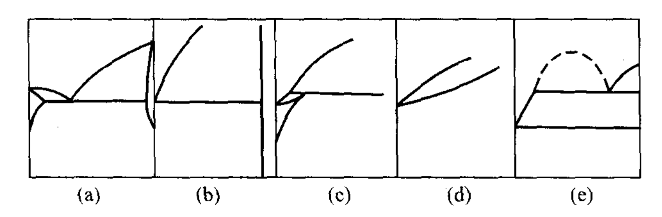


图6.4-8 二元易熔合金相图类型

1）二个纯金属或固溶体形成的共晶系（图6.4-8a），如Sn-Pb，Ga-Sn，Ga-In和Sn-Bi系等等。

2）纯金属或固溶体与化合物（中间相）形成的共晶系（图6.4-8b），如K-Sn，Cs-Bi，Li-Bi和Ga-Na系等等。锡合金二元共晶相图液相线走势见图6.4-9。

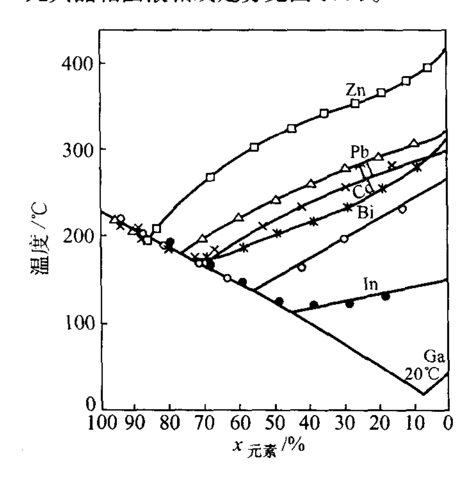


图6.4-9 锡的各种二元共晶相图液相线走势图

3）具有包晶反应的合金系（图6.4-8c），如In-Li，In-Sn和Sn-Sb系等。

4）纯金属之间或纯金属与化合物之间形成的固溶体合金系（图6.4-8d），如Bi-Sb，K-Rb和Li-Mg系等等。

5）具有偏晶反应的合金系（图6.4-8e），如K-Ga，K-Li，Ga-Bi，Ga-Tl，In-Se和Li-Na系等。

有的合金系还存在共析转变（固态相变），如Sn-Cd系合金。

三元以上合金相图很复杂，仅举两例（需要者可查找或研究）。

1）Sn-Bi-Pb系（图6.4-10）

2）Sn-Cd-Pb系（图6.4-11）

工业所指的易熔合金系由Sn，Bi，Pb，Cd，In，Ca和Tl等金属组成的二元、三元或多元合金，其特点是熔点低（20～227℃），多属共晶体为基础的合金。可做安全塞、火灾

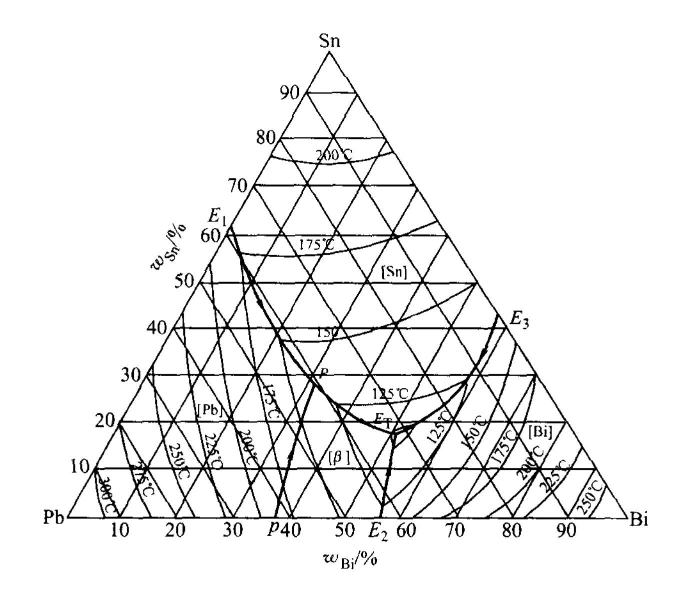


图6.4-10 Sn-Bi-Pb系相图

表6.4-31 相变点成分及温度

相变点	成分/%			温度/℃
	Sn	Bi	Pb	
2元共晶点（E_1）	61.9	—	余量	183
2元共晶点（E_2）	—	56.6	余量	125
2元共晶点（E_3）	余量	57.0	—	139
包晶点（p）	—	36.2	余量	184
包共晶点（P）	—	—	—	—
3元共晶点（E_T）	15.8	52.6	余量	99.5

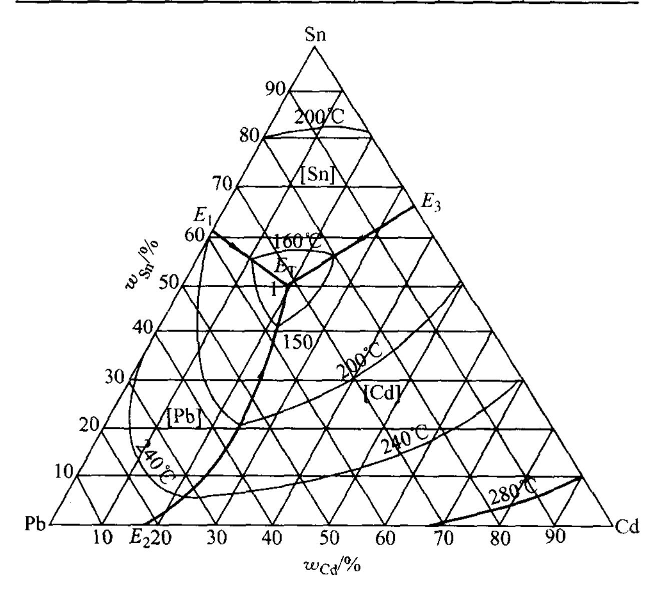


图6.4-11 Sn-Cd-Pb系相图

表6.4-32 相变点成分及温度

相变点	成分/%			温度/℃
	Sn	Cd	Pb	
2元共晶点（E_1）	61.9	—	余量	183
2元共晶点（E_2）	—	17.5	余量	248
2元共晶点（E_3）	余量	32.25	—	177
3元共晶点（E_T）	50.0	18.0	余量	145

警报器、保险丝、焊料、塑料模具或镀覆模具、薄板冲压模具、密封装置、某些工件、金属腻子、解剖模型、铸造样模和热处理液等等。含 Bi，Ga，In 和 Tl 的合金，凝固时有膨胀性质，可制成凝固时膨胀合金（如印刷铅字合金）或凝固时无尺寸变化合金（无收缩及膨胀合金）。

3.3 易熔合金

3.3.1 铅锡铋易熔合金

铅锡铋易熔合金分共晶型和非共晶型两种，其成分和熔点见表 6.4-33。

表 6.4-33 常用易熔合金成分和熔点

共晶型合金化学成分/%					熔点/℃	非共晶型合金化学成分/%					熔点/℃
Bi	Pb	Sn	Cd	In		Bi	Pb	Sn	Cd	In	
—	38.14	61.86	—	—	183	12.60	47.50	39.90	—	—	176～145
—	30.60	51.20	18.20	—	143	21.00	42.00	37.00	—	—	152～120
58.00	—	42.00	—	—	138	33.33	33.34	33.33	—	—	143～95
55.50	44.50	—	—	—	124	5.00	32.00	45.00	18.00	—	139～132
52.00	32.00	16.00	—	—	95	59.40	14.80	25.80	—	—	114～95
51.65	40.20	—	8.15	—	91.5	56.00	22.00	22.00	—	—	104～95
50.00	26.70	13.30	10.00	—	70	52.00	31.70	15.30	1.00	—	92～83
49.40	18.00	11.60	—	21.00	58	42.50	37.70	11.30	8.50	—	90～70
44.70	22.60	8.30	5.30	19.10	46.7						

3.3.2 镓铟易熔合金

镓基易熔合金无毒并有液态特性，用于取代真空扩散泵及某些仪表中的有害金属汞，也可作为某些真空密封的“水封”之用。镓配制的冷焊剂，可作金属与陶瓷间的焊接或填补空洞。镓或铟的焊料，皆可作玻璃与玻璃，玻璃与金属的焊接。铟基易熔合金还可作异形薄壁管的弯曲处加工的固形充填物，不易滑动和断裂，容易清除和清洗。利用其膨胀特性可作安装难固定处的卡夹材料或作珠宝加工的支撑夹具。铟基焊料主要用于电子及低温物理领域，即防止损坏印刷电路板，亦可利用其熔点逐渐降低而实现堆焊电子元件等。In－（25～37.5）Sn－（25～37.5）Pb，In－75Sn，In－50Sn 及 In－50Pb 合金具有抗腐蚀特性，故作氯碱工业化工设备的焊料。铟与银、钙和铅等金属能形成 47～234℃的焊料（俗称软合金）。汞可溶解很多金属形合金（即汞齐）。在 Pb-SnBiCd 合金中加汞，随汞含量不同，其熔点可由＋70～－39℃之间变化。

镓铟基易熔合金成分和熔点见表 6.4-34。

表 6.4-34 镓、铟基易熔合金成分和熔点

易熔合金化学成分/%						熔点/℃	易熔合金化学成分/%						熔点/℃
Ga	In	Sn	Pb	Bi	Cd		Ga	In	Sn	Pb	Bi	Cd	
余量	25.0	13.0	—	—	—	5	—	余量	12.0	18.0	49.0	—	58
余量	10.0	60.0	—	—	—	12	—	余量	16.5	—	32.5	—	65
余量	29.0	(Zn) 4.0	—	—	—	13	—	余量	1.0	39.2	50.3	8.0	70
余量	24.0	—	—	—	—	16	—	余量	17.0	—	57.0	—	79
余量	—	8.0	—	—	—	20	—	余量	16.0	32.0	52.0	—	90.5
余量	65.0	(Au) 8.0	—	—	—	30	—	余量	—	—	—	25	123
—	余量	12.5	25.0	50.0	—	18	—	余量	(Ag) 5.0	5.0	—	—	147
—	余量	11.5	17.9	40.1	0.5	54	—	余量	70.0	18.0	—	—	162

编写：田荣璋（中南大学）
审稿：唐仁政（中南大学）

参考文献

1 孙连超，田荣璋．锌及锌合金物理冶金学．长沙：中南工业大学出版社，1994

2 中国机械工程学会铸造分会编．铸造手册．第2版：铸造非铁合金．北京：机械工业出版社，2002

3 K W 卡恩，P 哈森，EJ 克雷默主编．材料科学与技术丛书：第8卷，非铁合金的结构与性能．丁道云等译．北京：科学出版社，1999

4 冯君从．夜幕未除破晓迟——2003年锌市场展望．中国铅锌信息，2003，第2期（总第50期）：17～31

5 师昌绪，李德恒等．材料科学与工程手册：上卷．北京：化学工业出版社，2004

6 李松瑞主编．铅及铅合金．长沙：中南工业大学出版社，1996

7 铅锌冶金学编委会．铅锌冶金学．北京：科学出版社，2003

8 机械工程手册编委员．机械工程手册．第2版：工程材料卷．北京：机械工业出版社，1996

9 黄位森主编．锡．北京：冶金工业出版社，2001

第7篇

钛及钛合金

主　编　李成功　马济民　邓　炬

编　写　马济民　于振涛　王庆如　王金友　王桂生　邓　炬
朱知寿　李成功　李四清　曲恒磊　沙爱学　何　瑜
陈　军　张　翥　张树启　赵永庆　谢成木　魏寿庸

审　稿　中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会

常用量的名称、符号及单位表

名称	符号	单位
艾氏冲击韧度	a_{KI}	J
U形缺口试样冲击韧度	a_{KU}	kJ/m^2
V形缺口试样冲击韧度	a_{KV}	kJ/m^2
宽度	B	mm
疲劳强度指数	b	—
弦向	C	—
比热容	c	J/（kg·℃）
疲劳延性指数	c	—
材料常数	C，n	—
中心裂纹拉伸试样	CCT	—
紧凑拉伸试样	CT	—
弯芯直径	D	mm
焊嘴直径	D_z	mm
冷镦比	D_f/D_0	—
细节疲劳额定强度	DFR	MPa
直径	d	mm
钨极直径	d_w	mm
疲劳裂纹扩展速率	da/dN	mm/周
弹性模量（静态）	E	GPa
压缩弹性模量	E_C	GPa
弹性模量（动态）	E_D	GPa
热电势	e	mV
边距与孔径之比	e/D	—
频率	f	Hz
切变模量	G	GPa
电导率	g	%IACS
磁场强度	H	A/m
布氏硬度	HB	—
热等静压处理	HIP	—
洛氏硬度	HRB、HRC、HRF、HRM、HR·30T	—
肖氏硬度	HS	—
维氏硬度（显微硬度）	HV	—
高度	h，(H)	mm
焊接电流	I	A
加载系数	K	—
循环强度系数	K'	MPa
平面应力断裂韧度	K_C	$MPa\sqrt{m}$
平面应变断裂韧度	K_{1C}	$MPa\sqrt{m}$
应力腐蚀断裂韧度	K_{ISCC}	$MPa\sqrt{m}$
理论应力集中系数	K_t	—
纵向	L	—

续表

名称	符号	单位
长度	l，(L)	mm
长横向	LT	—
退火	M	—
质量，重量	m	kg，g，mg，t
应变速率敏感指数	m	—
疲劳寿命	N	周
中值疲劳寿命	N_{50}	周
2个95%疲劳寿命	$N_{95/95}$	周
失效反向数	$2N_f$	周
样本大小	n	—
循环应变硬化指数	n'	—
单点正拉强度	P_b	N/点
电极压力	P_j	N
设计载荷	P_{sj}	kN，N
单点剪切强度	P_τ	N/点
气体流量	Q	L/min
背面气体流量	Q_b	L/min
半径	R	mm
曲率半径	R	mm
应力比	R	—
径向	R	—
热加工	R	—
表面粗糙度	R_a	μm
面积	S	cm^2，mm^2
短横向	ST	—
固溶处理	ST	—
固溶时效	STA	—
横向	T	—
居里点	T_c	℃
时间	t	h，min，s
通电时间	t_h	s
通电时间间隔	t_s	s
电弧电压	U	V
体积	V	cm^3，L
焊接速度	v	m/min，m/h
质量分数	w	%
冷作硬化	Y	—
晶粒尺寸	Z	mm
弯曲角	α	(°)
线胀系数	α_l	$10^{-6}\cdot K^{-1}$
电阻温度系数	α_R	$℃^{-1}$
平面角	α，β	(°)

续表

名称	符号	单位
应力强度因子范围	ΔK	$MPa \cdot m^{1/2}$
应力强度因子门槛值	ΔK_{th}	$MPa \cdot m^{1/2}$
弹性应变范围	$\Delta \varepsilon_e$	%
塑性应变范围	$\Delta \varepsilon_p$	%
总应变范围	$\Delta \varepsilon_t$	%
应力范围	$\Delta \sigma$	MPa
厚度，壁厚	δ	mm
断后伸长率	δ，δ_5，δ_{10}，δ_{25}（$L_0 = 25$ mm），δ_{50}（$L_0 = 50$ mm）	%
应变率	ε	%，mm/mm
塑性应变	ε_p	%，mm/mm
初始应变速率	$\dot{\varepsilon}_0$	s^{-1}
疲劳延性指数	ε'_f	%
强度系数	η	%
缺口试样偏斜抗拉强度下降率	η	%
焊透率	η_t	%
热导率	λ	W/（m·℃）
泊松比	μ	—
摩擦系数	μ	—
密度	ρ	g/cm^3
电阻率	ρ	$\mu\Omega \cdot m$
摄氏温度	θ	℃
正应力	σ	MPa
应力松弛初始应力	σ_0	MPa
斜率取 0.7 时割线屈服极限	$\sigma_{0.7}$	MPa
斜率取 0.85 时割线屈服极限	$\sigma_{0.85}$	MPa
应力幅	σ_a	MPa
抗拉强度	σ_b	MPa

续表

名称	符号	单位
抗压强度	σ_{bc}	MPa
缺口抗拉强度	σ_{bH}	MPa
缺口敏感系数	σ_{bH}/σ_b	—
承载强度	σ_{bru}	MPa
承载屈服强度	σ_{bry}	MPa
疲劳极限	σ_D	MPa
弹性极限	σ_e	MPa
疲劳强度系数	σ'_f	MPa
线材打结强度	σ_j	MPa
平均应力	σ_m	MPa
最大应力	σ_{max}，（τ_{max}）	MPa
最小应力	σ_{min}，（τ_{min}）	MPa
比例极限	σ_P	MPa
规定非比例伸长应力	$\sigma_{p0.001}$，$\sigma_{p0.002}$，$\sigma_{p0.005}$，$\sigma_{p0.01}$，$\sigma_{p0.1}$，$\sigma_{p0.2}$	MPa
规定非比例压缩应力	$\sigma_{pc0.1}$，$\sigma_{pc0.2}$	MPa
真实应力	σ_R	MPa
屈服点	σ_s	MPa
剩余应力	σ_t	MPa
持久强度	σ_t^{θ}（σ_{100}^{500}）	MPa
缺口持久强度	σ_H^{θ}（σ_{100H}^{500}）	MPa
蠕变强度	$\sigma_{\varepsilon_p/t}^{\theta}$（$\sigma_{0.2/100}^{500}$）	MPa
应力松弛度	（$\sigma_0 - \sigma_t$）/σ_0	%
切应力	τ	MPa
抗剪强度	τ	MPa
抗扭强度	τ_b	MPa
剪切疲劳极限	τ_D	MPa
规定非比例扭转应力	$\tau_{p0.01}$，$\tau_{p0.3}$	MPa
断面收缩率	ψ	%
体积分数	ψ	%
质量磁化率	X	m^3/kg

第1章 概 述

钛是20世纪50年代初走向工业化生产的一种重要金属。钛性质优良，储量丰富。从工业价值和资源寿命的发展前景看，它仅次于铁、铝而被誉为正在崛起的"第三金属"。钛是一种对社会经济和国防具有重要战略意义的稀有金属。钛具有许多重要的特性，如密度低、比强度高、耐腐蚀、线胀系数低、导热率低、无磁性、生理相容性好、表面可饰性强，具有储氢、超导、形状记忆、超弹和高阻尼等特殊功能。它既是优质的轻型耐腐蚀的结构材料，又是新型的功能材料以及重要的生物医用材料。在众多特性中，钛有两个最为显著的优点：比强度高和耐腐蚀性好。从而使它在空中、陆地、海洋和外层空间都有广泛的用途：包括航空航天、常规兵器、舰艇及海洋工程、核电及火力发电、化工与石油化工、冶金、建筑、交通、体育与生活用品等。与钢铁及铝合金等量大面广的金属材料相比，钛及钛合金虽然具有很多性能优势，但其生产和应用的规模及发展依然存在一定的限制因素，最重要的是制造加工过程比较复杂而成本价格偏高。钛及钛合金的扩大生产和应用尚有待于进一步的发展和努力。

1 钛的基本性能

(1) 钛的原子构造及晶体结构

钛在元素周期表中位于第四族第四长周期中，原子序数为22。钛原子的22个外层电子在各电子层的分布为：$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^2 4s^1$，其特点是d电子层不充满，属于过渡金属。钛的相对原子质量是47.90，其主要的同位素相对原子质量有46，47，48，49，50，其相对原子质量为48的同位素在自然界中的相对含量最高，达到73.45%。纯钛的熔化温度为1 640～1 670℃。钛有两种同素异晶体即α和β相，其同素异晶转变温度为882.5℃；转变温度以下为密排六方结构（hcp）的α相，而在882.5℃以上为体心立方结构（bcc）的β相。α-Ti在25℃时的点阵常数为$a=0.295\ 03$ nm，$c=0.468\ 31$ nm，$c/a=1.587\ 3$；β-Ti在25℃时的点阵常数为0.323 20 nm。纯钛的密度为4.50 g/cm³。

(2) 钛的电性能

钛的过渡金属原子构造决定了它具有高电阻。由于氧、氮、碳、铁等杂质对钛的电阻影响很大，所以钛的电阻测定分散性较大。纯度最高的碘化钛的比电阻$\rho=0.45\ \mu\Omega\cdot m$，随温度增高比电阻增加。当发生α→β转变时，比电阻下降，β-Ti的平均比电阻为$\rho=0.16\ \mu\Omega\cdot m$。许多研究表明，当温度接近绝对零度时，钛具有超导性，但因冷作硬化和微量杂质的影响很大，故纯钛的超导物理数据的分散性较大。

(3) 钛的热性能

钛和钛合金的线胀系数和比热容比较低，其热导率大约只是铝及铝合金热导率的1/15，是钢的1/5。工业纯钛的线膨胀系数和比热容见工业纯钛一节。

(4) 钛的化学及腐蚀性能

钛有很高的化学活性，并随温度升高而急剧增强。钛的活性表面在室温就开始吸氢，在300℃时吸氢量加大；钛与氧开始明显发生作用的温度是600℃；而与氮发生作用的温度则高于700℃。通过真空退火，几乎可以完全除去氢，而氧、氮则不可能除去。钛在空气介质中加热时，会在表面生成一种既薄、致密而稳定的氧化膜，它具有保护作用。钛在500℃以下的空气中是稳定的，在800℃以上时，氧化膜要分解，氧原子会进入晶格从而使金属变脆。在表7.1-1给出了工业纯钛在不同温度下的空气介质中，加热半小时后氧化膜的颜色和厚度。熔融状态的钛与已知的所有耐火材料都发生强烈反应。钛剧烈的氧化能发生燃烧，干钛粉的自燃温度为300～600℃。粉状、海绵钛、尘状、细屑状钛很容易由于火星或一个小火苗而引起燃烧。

表7.1-1 工业纯钛在不同温度空气中加热后的氧化膜颜色和厚度

θ/℃	200	300	400	500	650	700	750	800	900
氧化膜颜色	银白色	淡黄色	金黄色	蓝色	紫色	红灰色	红灰色	红灰色	灰色
氧化膜厚度/mm	—	—	—	极薄	0.005	0.008	0.025	—	—

钛及其合金对大部分化学介质具有突出的耐腐蚀性能。但4种无机酸：氢氟酸、盐酸、硫酸和正磷酸和另外4种热浓有机酸：草酸、甲酸、三氯乙酸和三氟乙酸以及腐蚀性极强的氯化铝，对钛及钛合金都有严重的腐蚀作用。钛对一些无水化学试剂如甲醇和四氧化氮的腐蚀是敏感的。在高温下，钛及其合金对干燥的氯化钠的应力腐蚀也是敏感的。

在与大多数金属构成的原电池系统中，钛及其合金的电位是属于高价的正电位，从而使其他金属与其接触时被腐蚀，钛的电位仅低于镍基合金，有良好的抗电化学腐蚀性能。

对钛及其合金来说，氢脆是一个重要问题。钛容易从酸洗液、腐蚀液和热加工的高温气氛中吸氢。钛及其合金的氢脆可以表现为以下两种形式：对工业纯钛和α合金，氢脆表现为塑性降低，而强度稍有增加，同时在低于93℃时合金冲击韧性降低；另一种形式则类似于钢的脆化，在恒载荷或持续载荷下，进行慢速拉伸试验时出现的一种脆化现象。

(5) 钛的力学性能

钛中的杂质含量对钛的力学性能影响很大，杂质含量增多，可以提高其强度而降低塑性。最纯的钛用碘化法或电解方法获得。它们的杂质含量如下：

杂质/%	C	N	O	Fe	Si
碘化钛	0.001	0.002	0.03～0.06	0.002	0.005
电解钛	0.008	0.004	≤0.037	0.009	0.002

杂质/%	Zr	Cl	Mn	Ti/%（主要成分）
碘化钛	0.050	0.002	0.003	99.870
电解钛	<0.001	0.073	≤0.001	99.837

高纯钛的性能特点是高塑性和低强度，其力学性能稳定，如表7.1-2所示。

表7.1-2 高纯钛的基本力学性能

性能	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ/%	ψ/%	HV/MPa	E/GPa
数值	250～300	140～190	50～70	76～88	89～105	108（25℃），70（550℃）

氧、碳、氮是钛中经常存在的杂质，它们能提高钛的强度而降低其塑性，为表7.1-3所示。其中氮的影响最大，碳最小，而氧居中。

氢对钛的力学性能的影响主要体现在氢脆上。在钛中氢的含量达到一定数值后，将大大提高钛对缺口的敏感性，从

而急剧降低缺口试样的冲击韧性等性能。一般认为，钛中氢的含量应低于0.007%～0.008%（质量分数），而不允许高于0.012 5%～0.015%（质量分数），因为高于这个含量，在组织上将析出氢化物，并出现明显的氢脆现象。

表7.1-3　碳、氮、氧对高纯钛力学性能的影响

杂质（N、O、C）含量（质量分数）/%	R_B	σ_b/MPa	δ/%	ψ/%
碘化法纯钛	53	29.1	42.9	72.7
氮含量（质量分数）/%				
0.05	82	40.8	21.4	51
0.134	102	79.5	14.7	—
0.157	104	84.5	—	46
0.236	105	92	15.9	36
氧含量（质量分数）/%				
0.04	61	38.5	37.7	72.6
0.10	80	39.4	32.5	71.7
0.25	86	54.2	20.8	46.1
0.46	99	70	19.4	34.6
0.82	104	—		—
碳含量（质量分数）/%				
0.03	80	34.4	26.4	48
0.54	91	52.4	19.7	45
0.8	93	48.1	17.2	27.6

除氧、碳、氮外，对提高钛的强度影响较大的元素是硼、铍和铝。其他元素对钛的强度影响不那么强烈，但影响程度依次排列为铬、钴、铌、锰、铁、钒和锡。

2　常用钛及钛合金的分类、牌号、特点与应用

工业纯钛系指几种具有不同的铁、碳、氮、氧等杂质含量的非合金钛。它不能进行热处理强化。其成形性能优异，并且易于熔焊和钎焊。它主要用于制造各种非承力件，长期工作温度可达300℃。半成品有厚板、薄板、棒材、丝材、管材、锻件和铸件。主要变形工业纯钛牌号有TA0-1、TA0、TA0ELI、TA1、TA1ELI、TA2、TA2ELI、TA3、TA3ELI。重要铸造工业纯钛有ZTA1、ZTA2、ZTA3。

经典的钛合金分类方法，是指麦克格维纶于1956年提出的按照退火态相组成而进行分类的方法，即将钛合金划分为α型、α+β型、β型钛合金。近50年来，随着钛合金研究与应用的迅速发展，特别是热处理强化的钛合金，经常遇到的是非平衡状态的组织，因此按照亚稳定状态的相组成进行钛合金的分类更为可取。根据钛合金从β相区淬火后的相组成与β稳定元素含量关系的示意图（图7.1-1），可以将钛合金划分成以下六种类型。

1）α型钛合金　包括工业纯钛和只含α稳定元素的合金。

2）近α型钛合金　β稳定元素含量小于C_1的合金。

3）马氏体α+β型钛合金　β稳定元素含量从C_1到C_k的合金，这类合金可以简称为α+β型钛合金。

4）近亚稳定β型钛合金　β稳定元素含量从C_k到C_3的合金，这类合金可以简称为近β型钛合金。

5）亚稳定β型钛合金　β稳定元素含量从C_3到C_β的合金，这类合金可以简称为β型钛合金。

6）稳定β型钛合金　β稳定元素含量超过C_β的合金，简称为全β型钛合金。

各类钛合金的主要特征见图7.1-2。图中以Ti6-Al-4V为准，向右侧，随着β稳定元素的增加。合金的成形能力、应变速率敏感性、热处理强化效果和室温强度不断提高；向左侧，随着β稳定元素的减少，合金的β转变温度，流动应力，可焊性和高温强度有所增加。

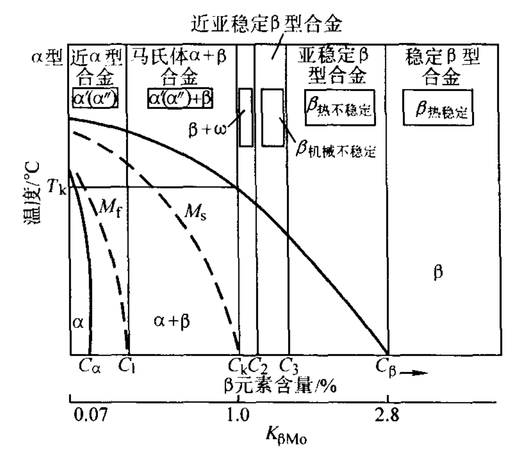


图7.1-1　钛合金从β相区淬火后的相组成与β稳定元素含量关系的示意图（$K_{\beta Mo}$－β相条件系数）

本书中收录的工业纯钛和α型钛合金有：TA0、TA1、TA2、TA3、TA5、TA7和TA9。近α型钛合金有：TA10、TA11、TA12、TA18、TA19、TA21、TC1、TC2、TA15、Ti-31、

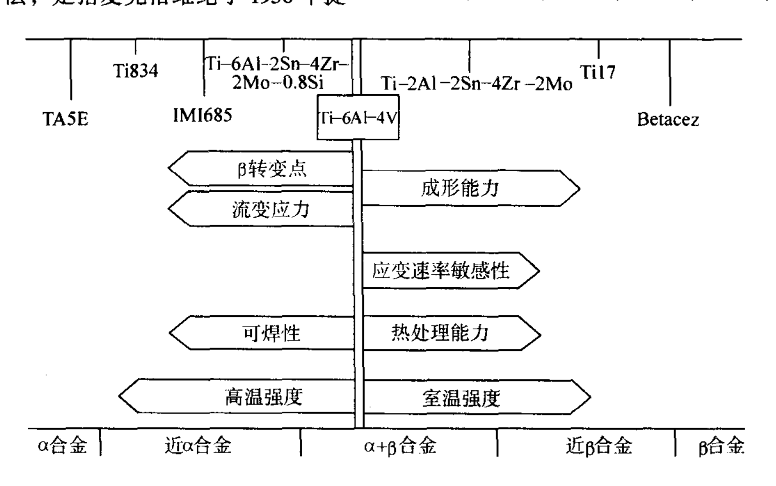


图7.1-2　各类钛合金的主要特征

Ti-75 和 Ti55311S。α + β 型钛合金有：TC4、TC6、TC11、TC16、TC17、TC18、TC19、TC20、TC21、Ti-451、ZTC3、ZTC4 和 ZTC5。稳定的 β 钛合金有 TB7 和 Ti40，其余为近 β 合金。

图 7.1-3 为本大典纳入的 39 个钛合金在相图中的相对位置。图 7.1-4 为整个相图中总体上各合金的强度分布水平（退火状态和固溶时效状态）和显微组织的变化规律。在临界成分 C_{kp} 附近的合金具有最细最均匀的显微组织和最高的强度等级。成分和显微组织对钛合金的性能起着决定性的作用。对钛合金的成分 - 组织 - 性能的研究中已经逐步由定性分析转变为定量的过程。图 7.1-5 是最常用的两相合金（α 和 β）球状显微组织、片状显微组织中结构参数与力学性能关系的描述，其中：D 为原始 β 晶粒度；d 为 α 集束的尺寸；b_1、b_2 为 $\alpha_{初}$ 和 $\alpha_{次}$ 的厚度；γ_2 为 $\alpha_{初}$ 体积含量。

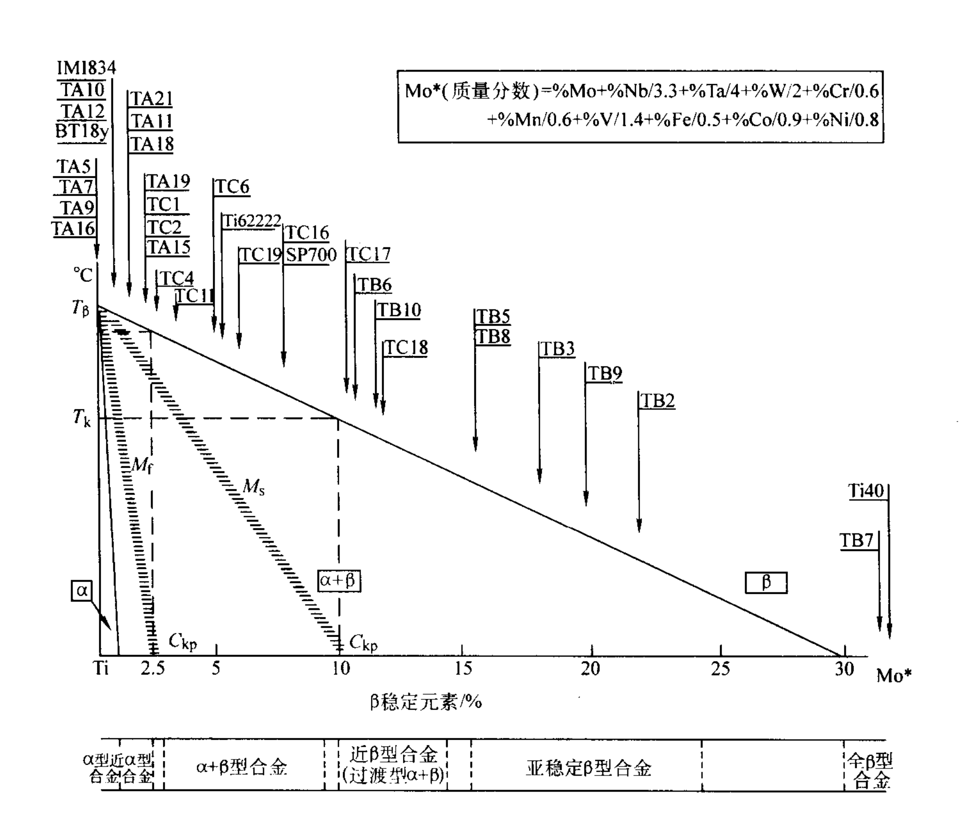


图 7.1-3 Ti-β 稳定元素相图上各钛合金分布示意图

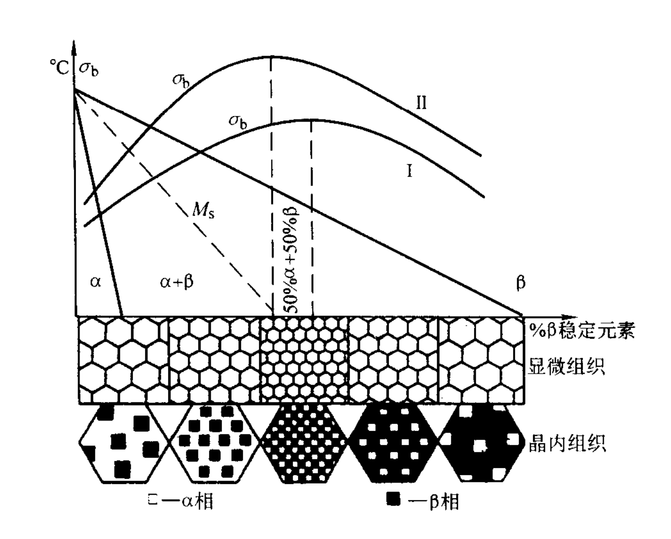
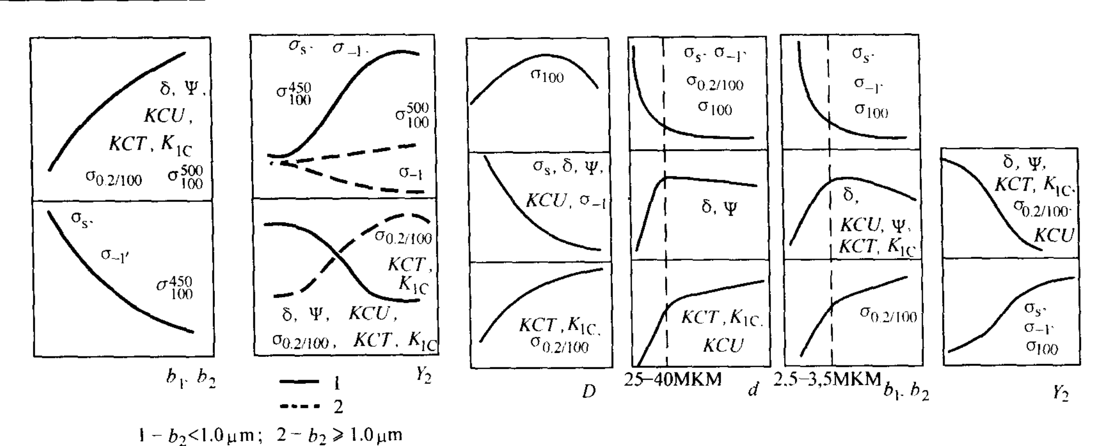


图 7.1-4 钛合金 β 稳定元素含量与组织、性能的关系

Ⅰ退火状态 Ⅱ固溶时效状态

以上合金的牌号，名义化学成分、工作温度、强度水平、特点和应用实例分别列于表 7.1-4、表 7.1-5 和表 7.1-6。

按照性能特点，钛合金又可以分为结构钛合金、热强钛合金、耐腐蚀钛合金和功能钛合金四大类。按照应用领域，钛合金可分为航空航天用钛合金和非航空航天用钛合金两大类。



(a) α+β合金的球状组织参数对力学性能影响的示意图

(a) α+β合金的片状组织参数对力学性能影响的示意图

图 7.1-5 α+β钛合金组织和性能关系

表 7.1-4 工业纯钛、α和近α钛合金

序号	合金类型	中国牌号	国外相近牌号	名义化学成分	工作温度/℃	强度水平/MPa	特点与应用
1	工业纯钛	TA0 TA1 TA2 TA3	Gr.1（美） BT1-00（俄） Gr.2（美） BT1-0（俄） Gr.3（美） Gr.4（美）	Ti Ti Ti Ti	300 300 300 300	≥280 ≥370 ≥440 ≥540	工业纯钛系指几种具有不同的 Fe、C、N、O 等杂质含量的非合金钛。不能进行热处理强化，成形性能优异，易于熔焊和钎焊。用于制造各种非承力件，长期工作温度可达 300℃
2	α	TA5	48-OT3	Ti-4Al-0.005B		≥680	具有优良的焊接性能和耐腐蚀性，制造海洋环境下使用的结构件
3	α	TA7 （TA7ELI）	Gr.6（美） BT5-1（俄）	Ti-5Al-2.5Sn	500	≥785	中强 α 钛合金，不能热处理强化。室温和高温下具有良好的断裂韧性。焊接性能良好，可制造机匣壳体、壁板等零件。可在 500℃下长期工作。TA7ELI 用于－253℃的低温工作零件
4	α	TA9	Gr.7（美）	Ti-0.2Pd	350	≥370	少量钯的加入改善了在氧化性介质中的耐蚀性，特别是抗缝隙腐蚀能力，在化工和防腐工程中的应用
5	近 α	TA16	ΠT-7M（俄）	Ti-2Al-2.5Zr	350	≥470	高塑性低强度，耐腐蚀性能好和焊接性能的管材合金
6	近 α	TA10	Gr.12（美）	Ti-0.3Mo-0.8Ni		≥485	耐蚀性能显著优于纯钛而接近 TA9
7	近 α	TA11	Ti-811（美）	Ti-8Al-1Mo-1V	500	≥895	具有较高弹性模量和较低的密度。室温强度与 TC4 相当，但高温性能高于 TC4。具有良好的焊接性能。适于制造发动机压气机盘、叶片和机匣等零件
8	近 α	TA12	Ti-55（国内）	Ti-5.5Al-4Sn-2Zr-1Mo-0.25Si-1Nd	550	≥980	属近 α 型热强钛合金，可在 550℃下长期工作，具有良好的工艺塑性，适于制造航空发动机压气盘、鼓筒和叶片等零件
9	近 α	TA18	Gr.9（美）	Ti-3Al-2.5V	320	≥620	能在室温下成形，有良好的焊接性能，其焊接性能和冷成形优于 TC4 合金。该合金无缝管用于承压的航空液压和燃油等管路系统
10	近 α	TA19	Ti-6242S（美）	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si	500	≥930	可在 500℃下长期工作的近 α 型钛合金，高温强度和蠕变性能优于 TA11 合金。适于制造航空发动机的压气机匣和飞机蒙皮等
11	近 α	TA21	OT4-0（俄）	Ti-1Al-1Mn	300	≥490	高塑性低强度，耐腐蚀性能和焊接性能好，主要用作管材和钣金零件

续表 7.1-4

序号	合金类型	中国牌号	国外相近牌号	名义化学成分	工作温度/℃	强度水平/MPa	特点与应用
12	近α	TC1	OT4-1（俄）	Ti-2Al-1.5Mn	350	≥590	主要性能特点是比纯钛略高的使用强度和很好的工艺塑性，兼具良好的焊接性能和热稳定性。不能采用固溶时效强化，可在350℃长期工作，适于制造形状复杂的航空钣金件
13	近α	TC2	OT4（俄）	Ti-4Al-1.5Mn	350	≥685	属于中强近α合金，不能热处理强化。具有良好的冲压焊接性能，可在350℃下长期工作，适于制造航空钣金件
14	近α	TA15 （TA15-1 TA15-2）	BT-20（俄） （BT20-1CB BT20-2CB）	Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V	500	≥930	属于高铝当量的近α型钛合金，既具有α型合金的良好热强性和可焊性，又具有近似α+β型钛合金的工艺塑性。TA15具有中强、良好的热稳定性和焊接性能。适于制造在500℃长期工作的航空零件
15	近α	TC20	IMI367（英）	Ti-6Al-7Nb	550	≥980	本合金无毒元素Nb取代TC4合金中的有毒元素V。其主要力学性能与TC4相当。具有优异的生物相容性。是一种外科植入物医用钛合金，目前在国内已有临床应用
16	近α	Ti-31	国内	Ti-3Al-0.8Mo-0.8Zr-0.8Ni		640	属可焊近α型钛合金，耐高温海水腐蚀，适于制造舰船管路系统零件
17	近α	Ti-75	国内	Ti-3Al-2Mo-2Zr		730	属中强可焊近α型钛合金，耐海水腐蚀，适于制造热交换器管板类零件
18	近α	Ti-55311S	IMI829（英）	Ti-5Al-3Sn-3Zr-1Nb-1Mo-0.3Si	550	980	属近α型热强钛合金，可在550℃下长期工作，适于制造各类航空发动机高温零部件。该合金在研制阶段

表 7.1-5　α－β型钛合金

序号	合金类型	中国牌号	国外相近牌号	名义化学成分	工作温度/℃	强度水平/MPa	特点与应用
1	α+β	TC4 （TC4ELI）	Gr.5（美） BT-6（俄）	Ti-6Al-4V	400	≥895	属中强α+β型钛合金，具有优良的综合性能，热加工工艺性能好，在航空航天工业中获得最广泛的应用。可在400℃下长期工作。适于制造航空发动机的风扇和压气机盘和叶片以及飞机的框和接头等零件。TC4ELI用于－196℃低温零件
2	α+β	TC6	BT3-1（俄）	Ti-6Al-2.5Mo-1.5Cr-0.5Fe-0.3Si	450	≥980	属马氏体型α+β型钛合金，可在450℃下长期工作，具有良好的热强性能，兼具优良的热加工性能。适于制造航空发动机压气机盘和叶片以及飞机的框、接头等承力件
3	α+β	TC11	BT9（俄）	Ti-6.5Al-1.5Zr-3.5Mo-0.3Si	500	≥1 030	属α+β型热强钛合金，可在500℃下长期工作，具有优异的热强性能并具有较高的室温强度和良好的热加工工艺性能。适于制造航空发动机压气机盘和叶片等零件
4	α+β	TC16	BT16（俄）	Ti-3Al-5Mo-4.5V	350	≥1 030	属马氏体型α+β钛合金，准高强钛合金，固溶时效后强度可达1 030 MPa以上，且应力集中敏感性小，适于制造紧固件
5	α+β	TC17	Ti-17（美）	Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	430	≥1 120	属富β稳定元素的α+β型高强钛合金。具有高强、断裂韧性好、淬透性高和锻造温度宽等优点。适于制造航空发动机风扇和压气机盘等大截面锻件，并能在430℃以下长期工作

续表 7.1-5

序号	合金类型	中国牌号	国外相近牌号	名义化学成分	工作温度/℃	强度水平/MPa	特点与应用
6	α+β	TC18	BT22（俄）	Ti-5Al-4.75Mo-4.75V-1Cr-1Fe	400	≥1 080（退火）	退火状态有高的强度，淬火状态有高的淬透性（250 mm），适宜制造承力构件和起落架零件
7	α+β	TC19	Ti-6246（美）	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	400	1 170	适合于中等温度、高强度的发动机压气机盘、风扇盘和叶片等重要构件
8	α+β	TC451	Corona5（美）	Ti-4.5Al-5Mo-2Cr-2Zr-0.2Si		≥850	热处理性能好，相同强度下其塑性和韧性优于 Ti-6Al-4V。冷热成形性、焊接性能良好
9	α+β	TC21	Ti62222（美）			≥1 100	属于高强韧性损伤容限型钛合金，用于航空重要承载构件。该合金在研制阶段
10	α+β	ZTC3	国内	Ti-5Al-2Sn-5Mo-0.3Si-0.02Ce	500	≥930	一种有共析元素 Si 和稀土元素 Ce 的铸造钛合金，在 500℃以下具有优良的热强性能，铸造性能好，无热裂化倾向，可用于制造航空发动机机匣、叶轮、支架等铸件
11	α+β	ZTC4	Ti-6Al-4V（美） BT6Л（俄）	Ti-6Al-4V	350	≥835	属中强铸造钛合金，可在 350℃下长期工作，是国内外应用最广的铸钛合金，可用于制造机匣、壳体、支架、框架等静止航空构件，也可用于转速不高的叶轮等构件
12	α+β	ZTC5	BT26Л（俄）	Ti-5.5Al-1.5Sn-3.5Zr-3Mo-1.5V-1Cu-0.8Fe	500	≥930	属耐热马氏体型 α+β 铸造钛合金。常温下具有高的强韧性匹配和良好的热稳定性。铸造工艺性能好，无热裂倾向。可用于制造各种航空航天静止高强构件

表 7.1-6 近β和β型钛合金

序号	合金类型	中国牌号	国外相近牌号	名义化学成分	工作温度/℃	强度水平/MPa	特点与应用
1	近β	TB2	国内	Ti-5Mo-5V-8Cr-3Al	300	≥1 100	在固溶状态有优良的冷成形性能和焊接性能。在固溶时效态有高强度和良好塑性匹配。适于作星箭连接带和航空航天用紧固件
2	近β	TB3	国内	Ti-10Mo-8V-1Fe-3.5Al	300	≥1 100	在固溶态有优异冷成形性能，在固溶时效态强韧性匹配良好。适于作航空航天紧固件和弹性元件
3	近β	TB5	Ti-15-3（美）	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	290	≥1 080	具有优异的冷成形性能，可在室温下成形中等复杂钣金件，也可在 700℃以上超塑成形，焊接性能优良。适于制造航空航天钣金件和紧固件
4	近β	TB6	Ti-10-2-3（美）	Ti-10V-2Fe-3Al	320	≥1 105	属于高强高韧型钛合金，可用于等温锻造。可使用于飞机机身、机翼和起落架结构中，若取代同等强度的高强钢，可减轻结构重量约 40%
5	近β	TB8	β21S（美）	Ti-15Mo-3Al-2.7Nb-0.25Si		≥1 200	良好的抗氧化、耐腐蚀高强合金。用于制造中等复杂程度的冷成形钣金零件和高强、抗氧化的承力构件。钛箔为复合材料的基体
6	近β	TB9	Ti-38644 βc（美）	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr		795～1 140	高强、耐蚀，可制作紧固件、弹簧、扭力棒、油、气、地热井的井管和壳体，钛箔为复合材料的基体
7	近β	TB10	国内	Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al	300	900～1 100	比强度高，断裂韧性好，淬透性高，热加工性能和切削性能优良。已用于石化承压构件及航空航天高强构件

续表 7.1-6

序号	合金类型	中国牌号	国外相近牌号	名义化学成分	工作温度/℃	强度水平/MPa	特点与应用
8	β	TB7	4201（俄） Ti-32Mo（美）	Ti-32Mo		≥800	优异的耐蚀性能，用于铸造化工机械的泵、阀等零件
9	β	Ti-40	国内	Ti-15Cr-25V-0.2Si	500	≥900	耐500℃以下高温，阻燃钛合金，适于航空发动机部件。该合金在研制中

3 钛及钛合金的生产及工艺流程

钛及钛合金的主导工艺流程是海绵钛的制备、钛锭的熔炼和钛材的加工。海绵钛是由金红石矿（TiO_2）经氯化形成 $TiCl_4$，然后用 Mg 还原 $TiCl_4$ 而获得的，也称克劳尔法（见图 7.1-6）。

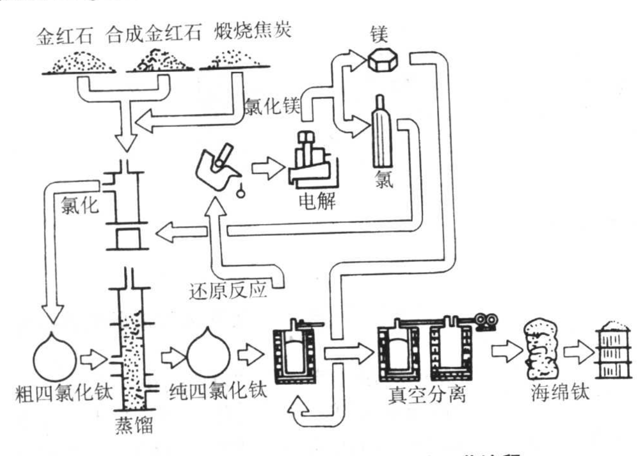


图 7.1-6 克劳尔法制取海绵钛的工艺流程

我国已探明的钛资源近 10×10^8 t-TiO_2，属世界第一。但 90%左右为岩矿床，属金属共生矿，可选性差，精矿品位低。而砂矿床则脉石含量少，可选性好，精矿品位高。我国年产数十万吨钛精矿（TiO_2）绝大部分用于钛白生产，用于海绵钛提取的只是少部分，就是说 TiO_2 并非制约我国钛工业发展的主要因素。我国海绵钛生产能力约为每年 4 000 t，近三年呈迅速增长趋势（见图 7.1-7），2002 产量已达 3 337 t，如果加上 2002 年进口海绵钛 2 000 t 左右，则 2002 年中国海绵钛的年消耗量已近 6 000 t（见图 7.1-8）。同时最大生产炉的能力也已增加到每炉 8 t，并已实现了还原 - 蒸馏联合法工艺。多年来，世界海绵钛产量均在 6×10^4 ~ 10×10^4 t间徘徊。

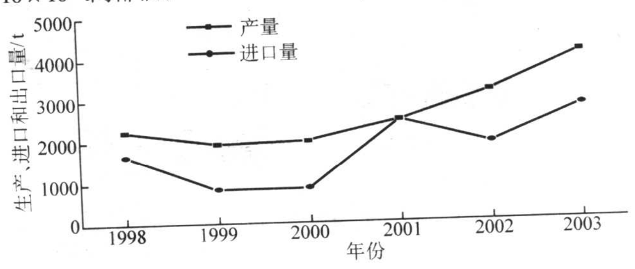


图 7.1-7 中国近年来海绵钛的生产、进口和出口量

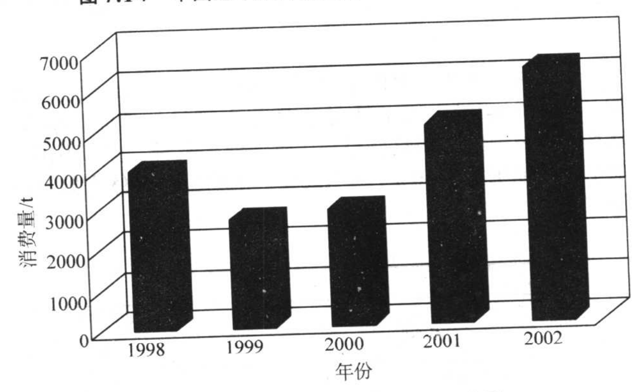


图 7.1-8 中国近年来海绵钛的消费量

钛锭的熔炼和钛材的加工工艺流程比较复杂，主要包括海绵钛的破碎精制和电极的压制焊接，然后采用真空自耗电极法熔炼数次形成钛锭，再锻压开坯，热轧和冷轧，最后经真空退火成卷材供应。钛合金半成品的生产流程见图 7.1-9。

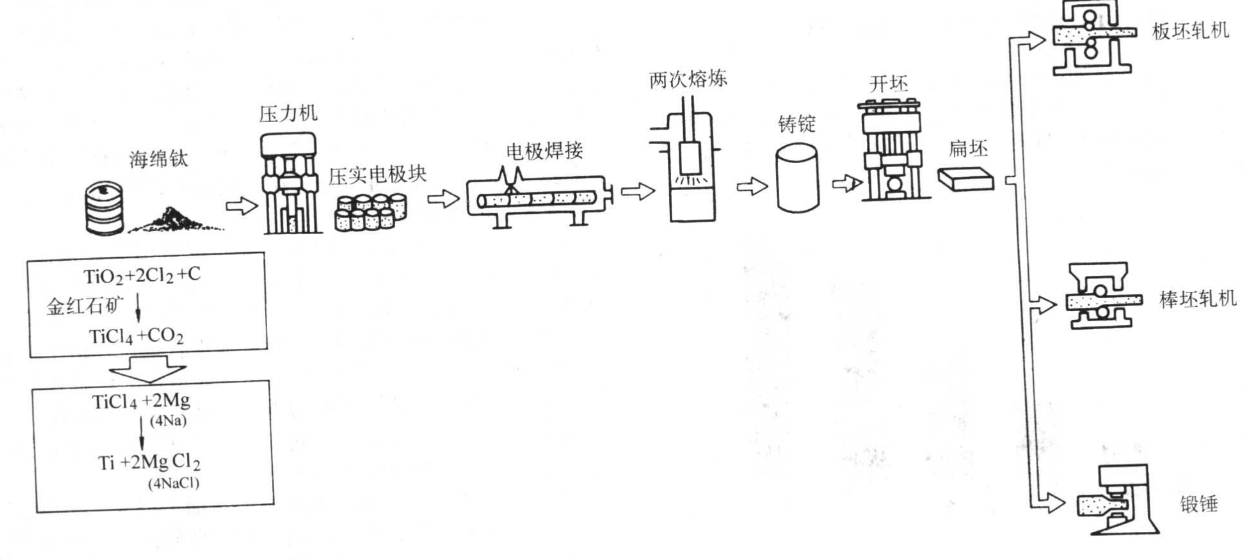
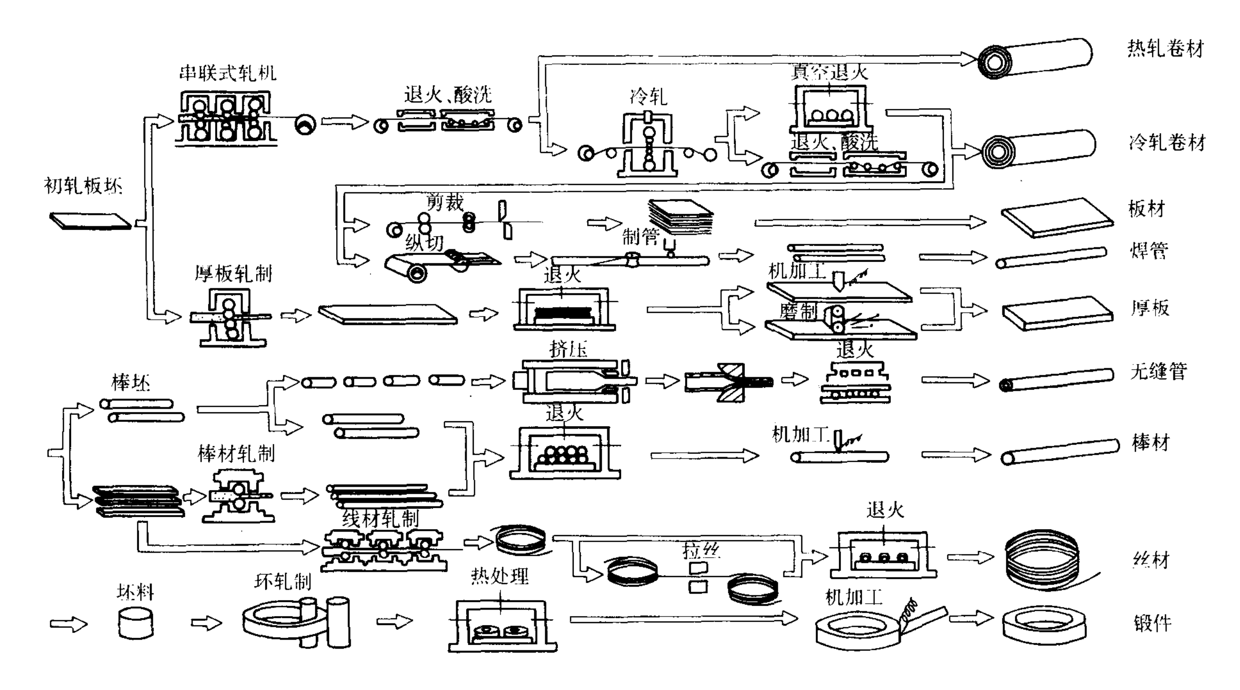


图 7.1-9 钛半成品生产过程



续图 7.1-9 钛半成品生产过程

近年来，世界钛材的年产量在 $5\times10^4\sim6\times10^4$ t 之间徘徊（见图 7.1-10）。加工钛材的品种主要是：薄板、厚板、锻坯、棒材、管材和丝材等。从应用分类来看，34%为民用航空，其他工业用 50%，军用 6%，生物医药和体育等新应用 10%。

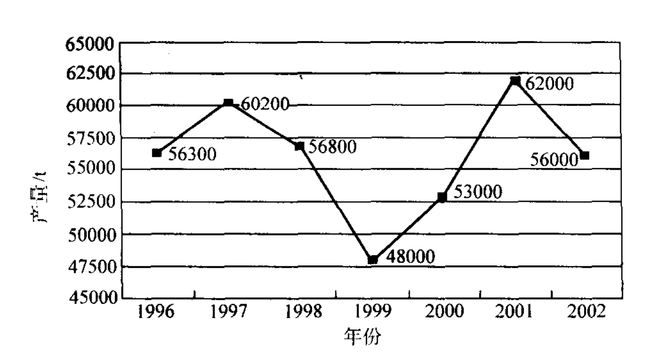


图 7.1-10 世界钛材产量近年来的变化情况

我国钛加工材的产能和产量近年来有显著增长，从过去的 3 000 t 左右年产量能到 2002 年实际年产钛材约 5 500 t，而 2002 年实际消费钛材则已达到 7 300 t。近年来中国钛材的消费增长见图 7.1-11。

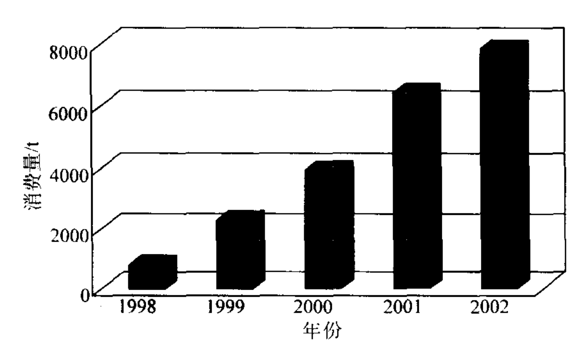


图 7.1-11 近年来中国钛材消费的增长情况

在钛工业的生产和工艺流程中，近年来发展的高新技术主要有以下几种。

1）海绵钛的新电解法生产，即“FFC 剑桥工艺” 它使用熔融的 $CaCl_2$ 作为电解质，还原固态的 TiO_2 粉末，在电极处取纯金属。电解槽的工作温度在 800～1 000℃，工作电压为 2.8～3.2 V。用这种方法生产的海绵钛的价格为目前镁还原钛价格（约 5.6～8.9 美元/kg）的一半或更低一些。

2）钛锭的冷炉床熔炼技术（CHM） 包括电子束冷炉床熔炼（EBCHM）和等离子冷炉床熔炼（PACHM），主要由电子枪或等离子枪、冷炉床和结晶器组成。它有三个工作区，即熔化区、精炼区和结晶区，其工作特点主要是通过控制功率密度、钛熔体在炉床上可停留较长时间，保证合金元素充分均匀，避免偏析。由于熔体长期在真空下可有效地去除易挥发杂质，使 H、Cl、Ca、Mg、K 等杂质达到很低的水平。在炉床中，低密度杂质（如 TiN）可以溶解或上浮，而高密度杂质（如 WC）则可以熔化或下沉，黏结到底部的凝壳上。钛铸锭减少低密度夹杂以及偏析的能力远远超过了三次真空自耗熔炼，成为当前航空发动机钛合金转动部件首选的原材料。通过控制功率，还可使结晶器出口的熔体过热度很小、溶池浅，有利于获得均质细晶铸锭。这种技术还可大量回收钛残料，从而使成本下降。目前冷炉床熔炼的最大圆锭重 22.7 t，最大扁锭重 16 t。在美国冷炉床熔炼的产能已占其钛熔炼总能力的 45%。

3）研究与发展钛系新合金主要是围绕提高使用温度、提高强韧性以及改善其综合性能和降低成本方面来进行。TiAl 和 Ti_3Al 等金属间化合物由于具有较低密度和较高使用温度而受到重视，已经出现了一批商业性合金并开始在航空航天领域和汽车工业等其他领域获得初步应用。钛基复合材料，包括连续纤维增强和颗粒增强的钛基复合材料也获得了一定的研究进展和初步应用。传统钛合金也还在沿着高温、高强和高韧的方向继续推陈出新。

4）优质、精密、高效、低成本的新加工技术 如快锻、径向精锻、等温锻造、热模锻造、超塑性轧制、超塑成形/扩散连接、交叉轧制、等温轧制、螺旋轧制、爆炸复合、β锻造和近β锻造、等径角挤压等。此外，钛合金的精密铸

造、热等静压、焊接工艺技术也有新的进展；激光熔融或激光成形和喷射沉积等新兴的工艺技术也取得了明显的进展和初步的应用。

5）多区超声扫描等高可靠性的无损检测新方法 这种方法可以减少假的显示信号，发现并定性空穴等缺陷。在与普通超声法对同一种 Ti-17 钛合金进行平行测试时，普通超声法未发现任何缺陷，而多区超声扫描能发现 13 个 WC 夹杂物，从而对关键部件的检测可靠性明显提高。

4 钛及钛合金的应用与发展

鉴于钛及钛合金具有高比强和耐蚀等显著优点，其应用领域十分宽广并且还不断的扩展之中，这涉及到航空航天、舰船、化工冶金等常规工业以及生物医用材料和艺术、体育、日常生活用品等方面，见图 7.1-12 以及表 7.1-9。

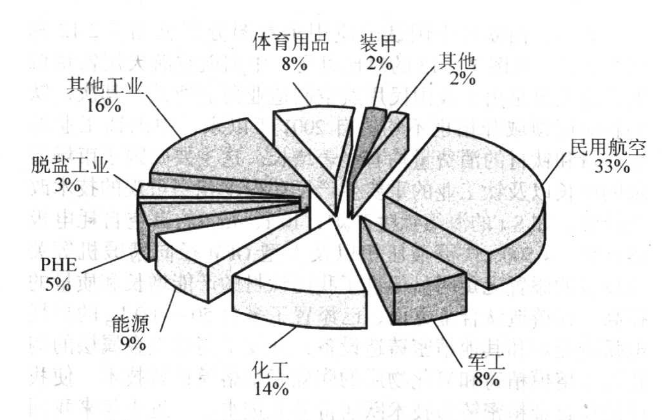


图 7.1-12 世纪末北美、西欧钛的应用领域示意图

表 7.1-9 钛及钛合金的用途

产业	应用领域	具体的使用部位
航空、宇宙航行	喷气发动机部件、机身部件、火箭、人造卫星、导弹等部件	压气机和风扇叶片、盘、机匣、导向叶片、轴、起落架、襟翼、阻流板、发动机舱、隔板、翼梁、燃料箱、火箭燃烧室、助推器
化学、石油化工及其他一般工业	尿素、乙酸、丙酮、三聚氰酰胺、硝酸、IPA、PO、已二酸、对苯二甲酸、丙烯腈、丙烯内酰胺、丙烯酸酯、无水马来酸、谷氨酸、浓漂白粉、造纸、纸浆	热交换器、反应槽、反应塔、压力釜、蒸馏塔、凝缩器、离心分离机、搅拌器、鼓风机、阀、泵、管道、计测器
	苏打、氯气	电极基板、电解槽
	表面处理	电镀用夹具、电极
	冶金	铜箔用滚筒、电解精炼用电极、EGL 电镀电极
	环保（排气、排液、除尘）	粪尿处理设备
发电、海水淡化	原子能、火力、地热发电、蒸发式海水淡化装置	透平冷凝器、冷凝器、管板、透平叶片、传热管
海洋开发，能源	石油、天然气开采	提升管
	石油精炼、LNG	热交换器
	深海艇、海洋温差发电	耐压壳体
	水产养殖	鱼网
	核废物处理/再处理/浓缩	离心分离机、磁体外套
土木建筑	屋顶、大厦的外装、港湾设施：桥梁、海底隧道	屋顶、外壁、装饰物、小配件类、立柱装饰、外装、纪念碑、标牌、门牌、栏杆、管道、防蚀被覆、工具类
运输机械	汽车部件（四轮车、二轮车）	连杆、阀门、护圈、弹簧、螺栓、螺母、油箱
	船用部件	热交换器、喷射簧片、水翼、通气管、螺旋桨
	铁路（直线性电机车及其他）	架式受电弓、低温恒温器、超导电机
医疗及其他	通信、光学仪器	照相机、曝光装置、印相装置、电池、海底中继器
	音响设备	振动板
	医疗、保健、福利	人工关节、齿科材料、手术器具、起波器、轮椅、手杖、碱离子净水器
体育用品	自行车零件	构架、胎圈、辐条、脚踏
	装饰品、佩带物	手表、眼镜框架、装饰品、剪子、剃须刀、打火机
	体育娱乐用品及其他	高尔夫球头、网球拍、登山工具、滑雪板、套架、雪橇、雪铲、马掌铁、击剑面具、钓具、游艇部件、氧气瓶、潜水刀、热水瓶、炒锅、家具、记录用具、印章、玩具

北美、西欧与中国钛的应用示意图分别见图 7.2-12 和图 7.2-13。从图 7.2-13 的对比可见，中国航空航天用钛量偏低，这主要是由于我国民用航空制造业薄弱所致。其次，钛的新应用领域开拓也不均。自 2001 年以来，中国钛工业的生产量和钛材的消费量均有显著增长。这主要归因于市场需求的增长以及钛工业的重要生产厂获得了相当可观的技术改造投资。如 8 t 的海绵钛生产炉，10 t、15 t 的真空自耗电极熔炼炉，4 500 t 快锻液压机以及大型 GFM 径向精锻机等关键设备的添置无疑明显促进了我国钛材的产能增长和质量的提高。在铸造钛合金方面，已添置了多台 50～400 kg 的自耗电弧凝壳炉和其他精密铸造设备；开发了高熔点金属层的陶瓷壳型熔模精铸和氧化物层的陶瓷壳型熔模精铸技术，使我国的钛合金精密铸造技术跃居世界先进水平。近十年来我国的钛合金精铸高尔夫球头生产得到很大的发展，年产量已达 200 多万件，每年消耗钛锭千吨以上，成为国际上最大的供应厂商。根据中国钛工业协会的预测中国钛材的产能、产量和消耗量到 2010 年可能分别达到 20 000 t、14 000 t 和 16 000 t 的水平（见图 7.1-14），并将进入世界前三名的排位（与美国和日本一起）。在数量增长的同时，钛材应用领域的结构将日趋合理化，航空航天用钛会有进一步的的增长，钛的新应用领域将会逐步扩展，钛工业在高新技术方面的提升将进一步在海绵钛的制取、钛锭熔炼和钛材的加工和检测等方面充分体现，如低能耗低成本的海绵钛制备新技术、冷炉床熔炼技术、优质高效的锻轧加工技术和多区超声扫描检测技术等将获得推广应用。中国将逐步从一个钛资源大国向钛的研究发展和生产应用大国迈进。

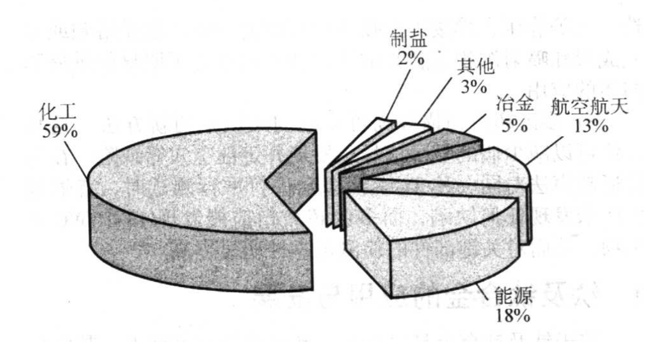


图 7.1-13 2002 年中国钛的应用领域示意图

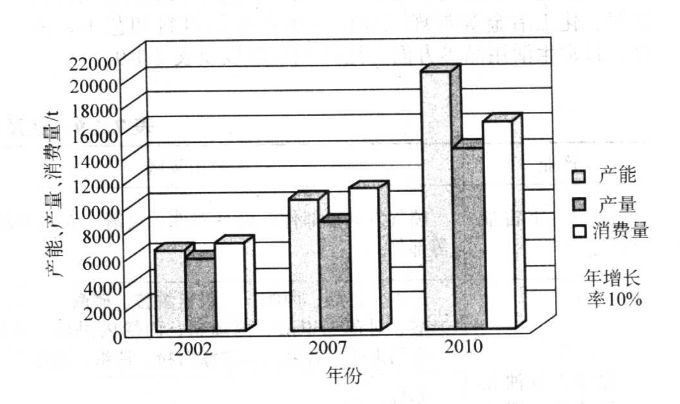


图 7.1-14 2010 年中国钛材产能、产量和消耗量预测

编写：李成功（中国材料研究学会）

第2章　工业纯钛、α和近α型钛合金

1　工业纯钛 TA0、TA1、TA2、TA3

工业纯钛是指具有不同杂质含量的非合金钛。其主要杂质有铁、硅、碳、氮、氧、氢。不同强度级别和工业纯钛主要区别于杂质的含量，尤其是氧、氮和铁的含量。氧和氮在α钛中具有高的溶解度，通过固溶强化α相，可显著提高强度，降低塑性。

工业纯钛的强度在 280 ~ 720 MPa 范围内，具有较高的塑性和优良的成形工艺性能，并且具有优异的耐腐蚀性能。工业纯钛还可以用各种方式进行焊接，其接头强度和塑性几乎与基体金属一样。工业纯钛可以加工成各种半成品，包括板材、箔材、棒材、丝材、管材、锻件、铸件等。

工业纯钛以其优良的综合性能应用于各种领域，包括航空、航天、船舶、化工、生物医学、建筑、交通运输等。工业纯钛的长期工作温度为 300℃。

1）材料牌号

① 变形纯钛　TA0，TA0ELI，TA0-1，TA1，TA1ELI，TA2，TA2ELI，TA3，TA3ELI。

② 铸造纯钛　ZTA1，ZTA2，ZTA3。

2）相近牌号

TA0：BT1-00（俄罗斯）。

TA1：BT1-0（俄罗斯），Ti-40（美国）。

TA2：Ti-55（美国）。

TA3：Ti-70（美国）。

1.1　化学成分

GB/T 3620.1—1994《钛及钛合金牌号和化学成分》和 GB/T 15073—1994《铸造钛及钛合金牌号和化学成分》规定的工业纯钛化学成分见表 7.2-1。GB/T 3623—1998《钛及钛合金丝》和 XJ/BS 5155—2001《航空用钛及钛合金焊丝》规定的工业纯钛焊丝的化学成分见表 7.2-2。

表 7.2-1　工业纯钛的化学成分（质量分数）%

牌号	合金元素	杂质≤							
	Ti	Fe	Si	C	N	H	O	其他元素① 单个	其他元素① 总和
TA0	基	0.15	—	0.10	0.03	0.015	0.15	0.10	0.40
TA1	基	0.25	—	0.10	0.03	0.015	0.20	0.10	0.40
TA2	基	0.30	—	0.10	0.05	0.015	0.25	0.10	0.40
TA3	基	0.40	—	0.10	0.05	0.015	0.30	0.10	0.40
ZTA1	基	0.25	0.10	0.10	0.03	0.015	0.25	0.10	0.40
ZTA2	基	0.30	0.10	0.10	0.05	0.015	0.35	0.10	0.40
ZTA3	基	0.40	0.10	0.10	0.05	0.015	0.40	0.10	0.40

① 产品出厂时供方可不检验其他元素，用户要求并在合同中注明时可予以检验。

1.2　物理及化学性能

1）密度　$\rho = 4.50\ g/cm^3$。

2）熔化温度范围　1 640 ~ 1 670℃。

表 7.2-2　工业纯钛焊丝的化学成分（质量分数）%

牌号	合金元素		杂质≤							
	Ti	Al	Fe	Si	C	N	H	O	其他元素① 单个	其他元素① 总和
TA0-1	基	≤0.20	0.15	0.08	0.05	0.03	0.003	0.12	—	0.10
TA0	基	—	0.10	—	0.05	0.03	0.012	0.10	0.10	0.40
TA0ELI	基	—	0.10	—	0.03	0.02	0.008	0.10	0.05	0.20
TA1	基	—	0.20	—	0.05	0.03	0.012	0.15	0.10	0.40
TA1ELI	基	—	0.20	—	0.05	0.03	0.008	0.10	0.05	0.20
TA2	基	—	0.25	—	0.05	0.05	0.012	0.20	0.10	0.40
TA2ELI	基	—	0.25	—	0.05	0.04	0.008	0.18	0.05	0.20
TA3	基	—	0.35	—	0.05	0.05	0.012	0.25	0.10	0.40
TA3ELI	基	—	0.30	—	0.05	0.05	0.008	0.25	0.05	0.20

① 产品出厂时供方可不检验其他元素，用户要求并在合同中注明时可予以检验。低间隙牌号的其他元素包括：Al、V、Sn。

3）热导率　见表 7.2-3。

表 7.2-3　工业纯钛的热导率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
$\lambda/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	19.3	18.9	18.4	18.0	18.0	18.0	18.0

4）比热容　见表 7.2-4。

表 7.2-4　工业纯钛的比热容

θ/℃	100	200	300	400	500	600
$c/J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	503	545	566	587	628	670

5）线胀系数　见表 7.2-5。

表 7.2-5　工业纯钛的线胀系数

θ/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400	20 ~ 500	20 ~ 600	20 ~ 700
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	8.2	8.6	8.8	9.1	9.3	9.5	9.6

θ/℃	100 ~ 200	200 ~ 300	300 ~ 400	400 ~ 500	500 ~ 600	600 ~ 700
$\alpha_l/10^{-6}K^{-1}$	8.9	9.3	9.8	10.2	10.4	10.5

6）电性能　室温电阻率 $\rho = 0.487\ \mu\Omega \cdot m$。

7）磁性能　无磁性。

8）抗氧化性能　钛在通常的使用温度下的空气介质中加热时，会生成一种极薄、致密和稳定的氧化膜，具有保护作用，因此钛在 500℃以下的空气中是稳定的。钛在 800℃以上时，氧化膜要分解，氧原子将进入金属晶格，使钛的氧含量增加，氧化膜也增厚，已失去保护作用，并使金属变脆。表 7.2-6 给出了工业纯钛，在不同温度下的空气介质中，加热半小时后氧化膜的厚度。表 7.2-7 给出了钛在不同温度下，加热所生成氧化膜的颜色。

表 7.2-6　工业纯钛的氧化膜厚度

θ/℃	320～540	650	700	760
氧化膜厚度/mm	极薄	0.005	0.008	0.025

表 7.2-7　工业纯钛不同温度下的氧化膜颜色

θ/℃	200	300	400	500	600	700～800	900
氧化膜颜色	银白色	淡黄色	金黄色	蓝色	紫色	红灰色	灰色

钛及其合金在低温下应避免与液态氧和气态氧接触，新生表面（如拉伸断裂产生的表面）与液态或气态氧相接触并受到冲击时，会发生强烈的反应。

9）耐腐蚀性能

① 化学腐蚀　钛及其合金对大部分化学介质具有突出的耐腐蚀性能。但4种无机酸：氢氟酸、盐酸、硫酸和正磷酸和4种热浓有机酸：草酸、甲酸、三氯乙酸和三氟乙酸，以及腐蚀性极强的氯化铝，对钛及其合金都有严重的腐蚀作用。在这些介质中，除氢氟酸外，在其溶液中加入氧化剂如硝酸，可使其腐蚀程度降低，甚至不起腐蚀作用。工业纯钛在有机酸、无机酸、有机化合物、碱溶液和盐溶液中的耐蚀性分别列于表 7.2-8～表 7.2-12。表中耐蚀性分为3个等级：

优良——耐腐蚀，腐蚀速率在 0.127 mm/a 以下。

良好——比较耐腐蚀，腐蚀速率在 0.127～1.27 mm/a 之间。

差——不耐腐蚀，腐蚀速率在 1.27 mm/a 以上。

表 7.2-8　工业纯钛在有机酸中的耐腐蚀性能

介质	浓度/%	θ/℃	腐蚀速率/mm·a⁻¹	耐蚀等级
醋酸	100	20	0.000	优良
		沸腾	0.000	优良
蚁酸	50	20	0.000	优良
草酸	5	20	0.127	良好
		沸腾	29.390	差
	10	20	0.008	优良
乳酸	10	20	0.000	优良
		沸腾	0.033	优良
	25	沸腾	0.028	优良
甲酸	10	沸腾	1.270	良好
	25	100	2.440	差
	50	100	7.620	差
单宁酸	25	20	<0.127	优良
		沸腾	<0.127	优良
柠檬酸	50	20	<0.127	优良
		沸腾	<0.127	优良
硬脂酸	100	20	<0.127	优良
		沸腾	<0.127	优良

表 7.2-9　工业纯钛在无机酸中的耐腐蚀性能

介质	浓度/%	θ/℃	腐蚀速率/mm·a⁻¹	耐蚀等级
盐酸	1	20	0.000	优良
		沸腾	0.345	良好
	5	20	0.000	优良
		沸腾	6.530	差
	10	20	0.175	良好
		沸腾	40.870	差
	20	20	1.340	差

续表 7.2-9

介质	浓度/%	θ/℃	腐蚀速率/mm·a⁻¹	耐蚀等级
	35	20	6.660	差
硫酸	5	20	0.000	优良
		沸腾	13.01	差
	10	20	0.231	良好
	60	20	0.277	良好
	80	20	32.660	差
	95	20	1.400	差
硝酸	37	20	0.000	优良
		沸腾	<0.127	优良
	64	20	0.000	优良
		沸腾	<0.127	优良
	95	20	0.002 5	优良
磷酸	10	20	0.000	优良
		沸腾	6.400	差
	30	20	0.000	优良
		沸腾	17.600	差
	50	20	0.097	优良
铬酸	20	20	<0.127	优良
		沸腾	<0.127	优良
硝酸+盐酸	1:3	20	0.004	优良
		沸腾	<0.127	优良
	3:1	20	<0.127	优良
硝酸+硫酸	7:3	20	<0.127	优良
	4:6	20	<0.127	优良

表 7.2-10　工业纯钛在有机化合物中的耐腐蚀性能

介质	浓度/%	θ/℃	腐蚀速率/mm·a⁻¹	耐蚀等级
苯（含微量 HCl、NaCl）	蒸气与液体	80	0.005	优良
四氯化碳	蒸气与液体	沸腾	0.005	优良
四氯乙烯（稳定）	100%蒸气与液体	沸腾	0.000 5	优良
四氯乙烯（H_2O）	100%蒸气与液体	沸腾	0.000 5	优良
三氯甲烯烷	100%蒸气与液体	沸腾	0.000 3	优良
三氯甲烷	—	沸腾	0.127	良好
三氯乙烯	99%蒸气与液体	沸腾	0.002 54	优良
三氯乙烯（稳定）	99	沸腾	0.002 54	优良
甲醛	37	沸腾	0.127	良好
甲醛（含 2.5%H_2SO_4）	50	沸腾	0.305	良好

表 7.2-11　工业纯钛在碱溶液中的耐腐蚀性能

介质	浓度/%	θ/℃	腐蚀速率/mm·a⁻¹	耐蚀等级
氢氧化钠	10	沸腾	0.020	优良
	20	20	<0.127	优良
		沸腾	<0.127	优良
	50	20	<0.002 5	优良

续表 7.2-11

介质	浓度/%	θ/℃	腐蚀速率/mm·a⁻¹	耐蚀等级
氢氧化钠		沸腾	0.050 8	优良
	73	沸腾	0.127	良好
氢氧化钾	10	沸腾	<0.127	优良
	25	沸腾	0.305	良好
	50	30	0.000	优良
		沸腾	2.743	差
氢氧化铵	28	20	0.002 5	优良
碳酸钠	20	20	<0.127	优良
		沸腾	<0.127	优良
氨（含2%NaOH）	—	20	0.070 8	优良

表 7.2-12 工业纯钛在盐溶液中的耐腐蚀性能

介质	浓度/%	θ/℃	腐蚀速率/mm·a⁻¹	耐蚀等级
氯化铁	40	20	0.000	优良
		95	0.002	优良
氯化亚铁	30	20	0.000	优良
		沸腾	<0.127	优良
氯化亚铅	10	20	<0.127	优良
		沸腾	<0.127	优良
氯化亚铜	50	20	<0.127	优良
		沸腾	<0.127	优良
氯化铵	10	20	<0.127	优良
		沸腾	0.000	优良
氯化钙	10	20	<0.127	优良
		沸腾	0.000	优良
氯化铝	25	20	<0.127	优良
		沸腾	<0.127	优良
氯化镁	10	20	<0.127	优良
		沸腾	<0.127	优良
氯化镍	5~10	20	<0.127	优良
		沸腾	<0.127	优良
氯化钡	20	20	<0.127	优良
		沸腾	<0.127	优良
硫酸铜	20	20	<0.127	优良
		沸腾	<0.127	优良
硫酸铵	20℃饱和	20	<0.127	优良
		沸腾	<0.127	优良
硫酸钠	50	20	<0.127	优良

续表 7.2-12

介质	浓度/%	θ/℃	腐蚀速率/mm·a⁻¹	耐蚀等级
硫酸钠		沸腾	<0.127	优良
硫酸亚铅	20℃饱和	20	<0.127	优良
		沸腾	<0.127	优良
硫酸亚铜	10	20	<0.127	优良
		沸腾	<0.127	优良
	30	20	<0.127	优良
		沸腾	<0.127	优良
硝酸银	11	20	<0.127	优良

钛对一些无水化学试剂，如甲醇和四氧化氮的应力腐蚀断裂是敏感的；微量水在两种情况下均抑制反应进行，然而在 N_2O_4 介质中，NO 是起主要作用的，在受抑制的 N_2O_4 中含有0.4%~0.8%的 NO。红色发烟硝酸中含有低于1.5%的水和10%~20%NO_2，它能导致金属产生裂纹并产生十分剧烈的反应。

钛及其合金在高温下，对干燥的氯化钠的应力腐蚀也是敏感的。这种现象在实验室里的230℃、260℃或更高温度的试验中曾大量出现，偶而在制造车间里也能观察到。推荐使用不含氯的溶剂清洗工作温度高于230℃的零件。

② 电化学腐蚀　在与大多数金属构成的原电池系统中，钛及其合金的电位是属于高价的正电位，从而使其他金属或合金与其接触时被腐蚀。钛的电位仅低于镍基合金。

③ 氢脆　对于钛及其合金来说，氢脆是一个重要问题。钛极易从酸洗液、腐蚀液和热加工（热变形和热处理）的高温气氛中吸收氢。钛及其合金的氢脆可以为下面两种形式之一，对于工业纯钛和α合金，氢脆表现为塑性降低，而强度稍有增加，同时还发现在低于93℃时，合金的冲击韧性降低，以及脆—塑转变温度范围发生变化。第二种形式是类似于钢的脆化，是在恒载荷下或持续载荷下，进行慢速试验时出现的一种脆化现象。这种试验方法通常采用缺口试样，施加高于某一强度水平的应力，观察其脆性发生的行为。通常规定在使用状态的钛及其合金的成品零件的氢含量应小于0.015%。

1.3 相变及显微组织

1）相变　纯钛在正常压力下有两种同素异晶体：882.5℃以下为α-Ti，具有密排六方点阵，点阵常数 $a=2.951\times10^{-10}$ m，$c/a=1.587$，比一般密排六方点阵的轴比1.633略小。882.5℃以上为β-Ti，具有体心立方点阵，点阵常数 $a=3.28\times10^{-10}$ m，α→β转变的体积效应不大，约为0.17%。

工业纯钛的α↔β相的转变温度为890~930℃。

2）显微组织　工业纯钛从β相区缓慢冷却后为单一α相组织。当从β相区快速冷却（>200℃/s）时，发生马氏体转变，获得针状α′相组织。冷却速度较小时，由于强烈的应力松弛现象，不出现马氏体针。如果从α+β区温度淬火，会形成初生α相和α′马氏体相不同比率的相组成。

1.4 力学性能

1）技术标准规定的性能见表7.2-13。

表 7.2-13　技术标准规定的工业纯钛性能

技术标准	牌号	品种	状态	δ 或 d/mm	取样方向	室温 σ_b/MPa	$\sigma_{P0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	α/(°)	a_{KU}/kJ·m^{-2}	HBS
							≥					
GB/T 3621—1994	TA0	板材	退火	0.3~2.0 2.1~5.0 5.1~10.0	LT	280~420	170	45 30 30	—	140 140 —	—	—
	TA1			0.3~2.0 2.1~5.0 5.1~10.0		370~350	250	40 30 30	—	140 130 —	—	—
	TA2			0.3~1.0 1.1~2.0 2.1~5.0 5.1~10.0 10.1~25.0		440~620	320	35 30 25 25 20	—	100 100 80 — —	—	—
	TA3			0.3~1.0 1.1~2.0 2.1~5.0 5.1~10.0		540~720	410	30 25 20 20	—	90 90 80 —	—	—
GB/T 3622—1999	TA0	带材	退火	0.3~<0.5 0.5~2.0	L	280~420	170	40① 45	—	150	—	—
	TA1			0.3~<0.5 0.5~2.0		370~530	250	35① 40	—	150	—	—
	TA2			0.3~<0.5 0.5~1.0 1.1~2.0		440~620	320	30① 35 30	—	140	—	—
GJB 2505—1995	TA0	板材（带材）	退火	0.3~2.0 2.1~5.0 5.1~10.0 10.1~30.0	LT（L）	280~420	170	45 30 30 25	—	140 140 — —	—	—
	TA1			0.3~2.0 2.1~5.0 5.1~10.0 10.1~30.0		370~530	250	40 30 30 25	—	140 130 — —	—	—
	TA2			0.3~1.0 1.1~2.0 2.1~5.0 5.1~10.0 10.1~30.0		440~620	320	35 30 25 25 18	—	100 100 90 — —	—	—
	TA3			0.3~1.0 1.1~2.0 2.1~5.0 5.1~10.0 10.1~30.0		540~720	410	30 25 20 20 16	—	90 90 80 — —	—	—
GB/T 3623—1998	TA0	丝材②	退火	0.1~7.0	L	≥280	—	20③	—	—	—	—
	TA1					≥370	—	18③	—	—	—	—
	TA2					≥440	—	15③	—	—	—	—
	TA3					≥540	—	15③	—	—	—	—
XJ/BS 5155—1997	TA0-1	焊丝	除氢退火	1.0~7.0	L	295~470	—	30	—	—	—	—
GB/T 3624—1995	TA0	管材	退火	d(3~110)×(0.2~4.5)	L	280~420	170	24①	—	—	—	—
	TA1					370~530	250	20①	—	—	—	—
	TA2					440~620	320	18①	—	—	—	—

续表 7.2-13

技术标准	牌号	品种	状态	δ 或 d/mm	取样方向	室温						
						σ_b/MPa	$\sigma_{P0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	α/(°)	a_{KU}/kJ·m^{-2}	HBS
							≥					
GB/T 2965—1996	TA0	棒材	退火	8 ~ 90	L	≥280	170	24	30	—	—	—
	TA1					≥370	250	20	30	—	—	—
	TA2					≥440	320	18	30	—	—	—
	TA3					≥540	410	15	25	—	—	—
GJB 2218—1994	TA2	棒材	退火	21 ~ 100	L	≥440	320	20	40	—	—	—
		饼、环		δ (38 ~ 110)	C	≥440	320	18	35	—	—	—
	TA3	棒材		21 ~ 100	L	≥540	410	15	35	—	—	—
		饼、环		δ (38 ~ 110)	C	≥540	410	15	30	—	—	—
GB/T 16598—1996	TA0	饼、环	退火	$S \leqslant 100\ cm^2$	C	≥280	170	30	35	—	—	—
	TA1					≥370	250	20	35	—	—	—
	TA2					≥440	320	18	35	—	—	—
	TA3					≥540	410	15	30	—	—	—
GJB 2744—1996	TA1	自由锻件、模锻件	退火	$m \leqslant 60$ kg	L④	≥310	—	20	45	—	490	d = 4.7 ~ 5.2 mm
	TA2					≥410	—	18	35	—	490	d = 4.7 ~ 5.2 mm
	TA3					≥510	—	13	30	—	490	d = 4.7 ~ 5.2 mm
GB/T 6614—1994	ZTA1	铸件	退火或热等静压	—	—	≥345	275	20	—	—	—	≤210
	ZTA2					≥440	370	13	—	—	—	≤235
	ZTA3					≥540	470	12	—	—	—	≤245
GJB 2896—1997	ZTA1	精密铸件	退火或热等静压	—	附铸试样⑤	≥345	275	12	—	—	—	—

① 试样尺寸规定为：L_0 = 50 mm。
② 焊丝不检验力学性能。
③ 试样尺寸规定为：$d \leqslant 4$ mm，L_0 = 50 mm；$d \geqslant 4$ mm，$L_0 = 4\ d$。
④ 采用横向或短横向试样测得的 δ_5 和 ψ 值允许比规定的纵向值低 20%。
⑤ 从铸件上切取试样的力学性能，允许比附铸试样的性能低 5%。

2）硬度　TA2 合金的室温硬度 HBS = 131 ~ 163。

3）拉伸性能见表 7.2-14。

表 7.2-14　工业纯钛的拉伸性能

牌号	品种	d/mm	状态	取样方向	θ /℃	σ_b /MPa	$\sigma_{P0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
TA2	锻棒	14	退火	L	-253	1 177	1 079	10	35
					-196	951	735	20	48
					20	490	373	30	55
					100	412	294	30	55
					150	343	245	30	55
					200	294	206	30	55

4）冲击性能见表 7.2-15。

表 7.2-15　工业纯钛的冲击性能

牌号	品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	a_{KU}/kJ·m^{-2}
TA2	锻棒	14	退火	L	-253	58.8
					-196	78.4
					20	98.1

5）持久和蠕变性能

① 高温持久性能见表 7.2-16。

表 7.2-16　工业纯钛的高温持久性能

牌号	品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_{100}/MPa
TA2	棒材	20	退火	L	350	191
					400	176
					450	98

② 高温蠕变性能见表 7.2-17。

表 7.2-17　工业纯钛的高温蠕变性能

牌号	品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	$\sigma_{0.2/100}$/MPa
TA2	棒材	20	退火	L	350	93
					400	68
					450	29

6）疲劳性能

旋转弯曲疲劳极限见表 7.2-18。

表 7.2-18 工业纯钛的旋转弯曲疲劳极限

牌号	品种	状态	θ/℃	K_t	R	N/周	σ_D/MPa
TA2	棒材	退火	20 350 400 450	1	-1	10^7	274 162 144 112

7）弹性性能

① 拉伸弹性模量见表 7.2-19。

表 7.2-19 工业纯钛的拉伸弹性模量

牌号	品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	E/GPa
TA2	锻棒	14	退火	L	20 100 150 200	107.9 102.0 93.2 88.2

② 切变模量 室温切变模量 $G = 44$ GPa。

③ 泊松比 室温泊松比 $\mu = 0.34 \sim 0.45$。

1.5 制造工艺和性能

（1）热处理制度

1）退火 板材、带材、箔材及管材：630～815℃，15～120 min，空冷或更慢冷；棒材、线材及锻件：630～815℃，1～2 h，空冷或更慢冷。

2）去应力退火 445～595℃，15～360 min，空冷或炉冷。ZTA1：600～750℃，1～4 h，炉冷。

3）真空除氢退火 真空炉内的真空工作压强应不大于 6.7×10^{-2} Pa，加热温度 550～800℃，保温时间 1～3 h；当截面厚度大于 50 mm 时，保温时间应大于 3 h。

（2）熔炼与铸造工艺

工业纯钛应经过两次以上真空自耗电弧炉熔炼。生产铸件时，可将一次真空自耗电弧炉熔炼的铸锭、或经过热变形的棒材作为自耗电极，在真空自耗电弧凝壳炉熔铸。对于中、小型铸件采用熔模精铸氧化物陶瓷型壳离心铸造；对于大型铸件可采用捣实石墨型或捣实复合砂型，重力铸造。

（3）热变形工艺

铸锭开坯加热温度为 1 000～1 050℃，每火变形量控制在 40%～50%。毛坯锻造加热温度为 900～950℃，变形量控制在 30%～40%。模锻加热温度为 900～950℃，终锻温度应不低于 650℃，为了达到成品零件应有的尺寸，其后的重复加热温度应不超过 815℃，或大约低于 β 转变温度 95℃。

（4）成形工艺

1）板材成形性能见表 7.2-20。

表 7.2-20 工业纯钛板材的成形性能

成形性能		牌号	冷态		热态	
			最低值或极限值	工作值	最低值或极限值	工作值
最小弯曲半径		TA2 TA3	(1.5～2.0) δ (1.7～2.0) δ	(2.5～3.0) δ (2.7～3.2) δ	(1.0～1.2) δ (1.0～1.5) δ	(1.5～1.8) δ (1.5～2.0) δ
极限拉深系数		TA2 TA3	2.0～2.1 1.96～2.0	1.7～1.75 1.65～1.72	2.5 2.5	2.0～2.4 2.0～2.4
极限翻边系数		TA2 TA3	1.75～1.8 1.7～1.78	1.6～1.7 1.52～1.62	>2.0 >2.0	1.7～1.8 1.7～1.8
极限压窝系数	平面压出	TA2 TA3	0.22～0.24 0.20～0.24	— —	>0.3 >0.3	— —
	球面压出	TA2 TA3	— —	— —	>0.5 >0.5	— —

2）弯曲性能 见表 7.2-21。

表 7.2-21 工业纯钛板材的弯曲性能

牌号	品种	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	$\alpha(D=3\delta)$/(°)
TA1 TA2 TA3	板材	0.3～2	退火	T	20	≥140 ≥120 ≥90

3）弯管的最小弯曲半径 见表 7.2-22。

表 7.2-22 工业纯钛弯管的最小弯曲半径

外径与壁厚比（D/δ）	最小弯曲半径（外径的倍数）
<10	1.2D
10～25	2.0D
25～50	2.7D
50～60	3.2D

4）热成形温度为 550～700℃。

（5）焊接性能

工业纯钛适合于各种焊接，焊接处具有极好的流动特性，并有与基体材料相当的强度、塑性和耐腐蚀性能。

1）氩弧焊

① 自动氩弧焊工艺规范见表 7.2-23。

② 自动氩弧焊对接接头的力学性能见表 7.2-24。

③ 手工氩弧焊工艺规范见表 7.2-25。

2）点焊

① 点焊工艺规范见表 7.2-26。

② 点焊接头的单点剪切和正拉强度见表 7.2-27。

3）缝焊

① 缝焊工艺规范见表 7.2-28。

② 缝焊接头力学性能见表 7.2-29。

4）焊后热处理 工业纯钛焊接构件一般不需进行焊后热处理，但对具有复杂焊缝和设计上要求消除焊接应力的构件，可进行以下热处理：400～450℃，6～8 h，空冷；或 500～600℃，1～2 h，空冷。

表 7.2-23 工业纯钛的自动氩弧焊工艺规范

板材 δ	焊丝 d	钨极 d	焊接层次次数	I/A	U/V	Q/L·min^{-1}		v/m·h^{-1}
mm						主喷嘴	拖罩	
1.5	不加焊丝	1.5	1	80~90	8~9	10~14	—	15
0.8~1.5	0.8~1.2	1.0~2.0	1	40~90	12~15	8~12	8~10	18~24
2.0~3.0	1.0~1.5	2.0~3.0	1	120~200	14~16	10~14	10~12	19~22
4.0~6.0	1.2~1.8	2.0~3.5	1~3	140~200	15~17	12~16	12~14	10~20
8.0~10.0	1.5~2.0	3.0~4.0	2~4	180~240	14~18	14~16	12~14	—
>12.0	2.0~2.5	3.0~4.0	>4	200~250	14~18	14~16	12~14	—

表 7.2-24 工业纯钛自动氩弧焊对接接头的力学性能

板材 δ /mm	焊前状态	焊后处理	焊丝牌号	θ/℃	σ_b /MPa	η/%	α/(°)
1.5	550℃，10~15 min，空冷	未处理	不加焊丝	20	628	100	158
				300	365	100	—
				400	325	100	—

表 7.2-25 工业纯钛的手工氩弧焊工艺规范

板材 δ /mm	I/A	填充材料尺寸/mm		主喷嘴直径 /mm	Q/L·min^{-1}
		直径	截面		
0.5	15~30	1.0	1.0×1.0	8~10	8~12
1.0	50~60	1.5	1.0×1.5	8~10	8~12
2.0	80~100	2.0	1.5×2.0	10~12	10~14
2.5	110~120	2.0	1.5×2.0	10~12	10~14
3.0	120~140	3.0	2.0×3.0	10~12	10~14
4.0	120~160	3.0	2.0×3.0	12~16	12~16
5.0	130~160	3.0	2.0×3.0	12~16	12~16
6.0	140~170	3.0~4.0	3.0×3.0	12~16	12~16
7.0	140~180	3.0~4.0	3.0×3.0	12~16	12~16
10.0	160~220	3.0~4.0	3.0×3.0	12~16	12~16

表 7.2-26 工业纯钛的点焊工艺规范

板材 δ /mm	电极直径 d /mm	I/A	t_h/s	P_j/N	核心尺寸	
					d/mm	η_t/%
1.5	7.0~7.5	8 100~8 200	0.28	4 568	7.0	80

表 7.2-27 工业纯钛点焊接头的单点剪切和正拉强度

板材 δ /mm	焊前状态	焊后处理	核心 d /mm	θ /℃	P_τ /N·点$^{-1}$	P_b /N·点$^{-1}$
1.5	退火	未处理	7.0	20	15 798	4 922
				300	11 571	—
				400	10 346	—

表 7.2-28 工业纯钛的缝焊工艺规范

板材 δ /mm	滚盘球面半径 /mm		I /A	t_h /s	t_s /s	v /m·min^{-1}	P_j /N	核心尺寸	
	上	下						d/mm	η_t/%
1.5	75	平面	8 200	0.14	0.48	0.25~0.40	4 510	6.0	80

表 7.2-29 工业纯钛的缝焊接头力学性能

板材 δ /mm	焊前状态	焊后处理	核心 d /mm	θ /℃	σ_b /MPa	η /%
1.5	退火	未处理	6.0	20	714	100
				300	308	90
				400	265	84

(6) 表面处理工艺

1) 清理　材料在600℃以上成形或热处理时所形成的氧化皮需进行表面清理。这种氧化皮的清理，首先用机械喷砂(刚玉砂)清除表面氧化皮，随后在2%~5%氢氟酸与硝酸的水溶液中酸洗。为了防止吸氢，硝酸与氢氟酸之比应大于10:1。酸洗时其溶液温度应控制在40~60℃之间。

酸洗的增氢量应严格控制，不能超过0.002%。

材料在600℃以下成形或去应力退火所形成的氧化皮的清理，只需在本节所述的溶液中直接酸洗，即可获得清洁的表面。

2) 表面硬化　当用钛制造具有相对运动的零件时，为了提高零件的耐磨性，零件的表面可进行氮化处理。氮化处理的表面硬度能达到600 KHN。

(7) 切削加工与磨削性能

1) 切削加工　工业纯钛的切削加工特性类似于奥氏体不锈钢。因此，钛是属于难切削加工的材料，但采用锋利的刀具，大走刀量，较低的切削速度和溶油性冷却液，以及刚性强的工卡是能够顺利地进行机加工的。

2) 锯切　工业纯钛的锯切，可采用高速磨擦锯，其锯切线速度为1 200~1 400 m/min。亦可采用弓锯和带锯，一般采用高速钢锯条，并采用慢的切削速度和大走刀量。如果工件表面带有氧化皮或污染层则会使锯条大量磨损。另外还可采用棕色刚玉或碳化硅砂轮片锯切，切削速度为10~30 m/s。

3) 磨削　零件精加工时才使用磨削，磨削应保持小的磨削量，一般使用碳化硅或刚玉砂轮。采用碳化硅砂轮，其磨削表面速度应保持在1 000~1 500 m/min，而采用刚玉砂轮时，则磨削速度可稍微低些。经过磨削的表面将产生表面应力，可根据零件使用要求，进行表面残余应力的消除。

1.6 选材及应用

工业纯钛以其优良的综合性能应用于各个领域。在飞机上主要用于非承力构件，例如TA1和TA2制造隔热内蒙皮、隔热板、机尾罩、减速板等。在船舶和化学工业方面均有广泛应用。在生物医学工程方面，TA1和TA2制造前络颈椎及其钉棍系统，头颅钛板、颌面钛板及关节系统等。

2 TA5钛合金

TA5（Ti-4Al-0.005B）合金是一种中等强度的α型钛合金，它含有4%的α稳定元素Al和微量元素B，其中Al使合金得到固溶强化，B可以细化合金组织。该合金不能热处理强化，通常在退火状态下使用。该合金具有优良的焊接性能和耐蚀性，可进行传统的压力加工和机械加工，其半成品主要有棒材、锻件、板材和丝材等。TA5合金用于制造海洋环境下使用的结构件，并已广泛地应用于船舶工业以及海洋工程环境。

1）材料牌号 TA5。

2）相近牌号 48-OT3（俄罗斯）。

2.1 化学成分

GB/T 3620.1《钛及钛合金牌号和化学成分》规定的TA5合金的化学成分见表7.2-30。

表7.2-30 TA5钛合金化学成分（质量分数） %

技术标准	合金元素			杂质≤						
	Ti	Al	B	Fe	C	N	H	O	其他元素	
									单个	总和
GB/T 3620.1	余量	3.3~4.7	0.005	0.30	0.10	0.04	0.015	0.15	0.10	0.4
48-OT3	余量	3.3~4.3	0.005	0.30	0.10	0.04	0.015	0.15	0.10	0.4

2.2 物理及化学性能

1）密度 $\rho = 4.43\ g/cm^3$。

2）热导率见表7.2-31。

表7.2-31 TA5钛合金热导率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
$\lambda/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	—	8.83	10.3	11.9	13.6	15.4	17.3

3）比热容见表7.2-32。

表7.2-32 TA5钛合金比热容

θ/℃	100	200	300	400	500	600
$c/J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	523	537	554	572	594	617

4）线胀系数见表7.2-33。

表7.2-33 TA5钛合金线胀系数

θ/℃	20~100	20~200	20~300	20~400	20~500	20~600	20~700
$\alpha_l/10^{-6}K^{-1}$	9.28	9.53	9.87	10.08	10.09	10.28	10.40

5）电阻率见表7.2-34。

表7.2-34 TA5钛合金电阻率

θ/℃	20	100	200	300	400	500
ρ/μΩ·m	1.26	—	—	—	—	—

6）透声系数 TA5合金的透声系数见表7.2-35。

表7.2-35 TA5钛合金的透声系数

合金	δ/mm	频率/kHz									
		5	10	15	20	24	30	34	40	45	50
TA2	0.5	—	99	—	99	—	99	—	—	98	96
	0.5①	—	99	—	99	—	98	—	—	98	98
	1	96	98	95	94	96	93	89	85	—	—
	2	96	99	87	86	87	77	79	82	—	—
TA5	2	96	98	93	86	—	81	79	71	—	—

① 中间带焊缝。

7）磁性能 无磁性。

8）抗氧化性能 与TA7合金相似。

9）耐腐蚀性能 钛及钛合金在海水中的耐蚀性优于铝合金、不锈钢和镍基合金。一般在使用中无点蚀、晶间腐蚀等。另外，由于该合金具有抗空泡破损能力，与其他钛合金具有相似的耐蚀性能，因此它尤其适合应用于海洋环境的结构件。

① TA5合金与纯钛在海洋环境的腐蚀试验结果见表7.2-36。

表7.2-36 TA5合金的海水腐蚀结果

合金牌号	试验方法	腐蚀率/mm·a⁻¹		
		1 a①	3 a①	5 a①
TA2	飞溅	0.000 070 8	0.000 053 3	0.000 038 8
	全浸	0.000 027 5	0.000 053 3	0.000 057 3
TA5	飞溅	0.000 097 7	0.000 051 9	0.000 035 9
	全浸	0.000 090 7	0.000 063 7	0.000 048 8

注：飞溅试样的一半在浪线以上；全浸试样在海水下0.5 m左右。

① 试验周期。

② TA5合金在高速流动海水中的耐蚀性见表7.2-37。

表7.2-37 TA5合金在高速海水中的冲刷腐蚀性能

合金牌号	腐蚀率/mm·a⁻¹			
	15 d①	30 d①	91 d①	184 d①
TA2	0	0	0.000 51	0.000 05
TA5	0	0	0.006 65	0.000 16

① 试验周期。

③ TA5合金的应力腐蚀性能见表7.2-38。

表7.2-38 TA5合金的应力腐蚀数据

合金牌号	大气	海水
	$K_{1C}/MPa\sqrt{m}$	$K_{1C}/MPa\sqrt{m}$
TA3	3 915	1 855
TA5	3 040	>2 450

2.3 相变及显微组织

1）相变温度 α+β↔β相的转变温度为980~1 000℃。

2）显微组织 TA5合金退火状态下主要为α相组织，

偶尔也发现组织中有少量的硼化物相。

2.4 力学性能

1）技术标准规定的性能见表7.2-39。

表7.2-39　TA5合金技术标准规定的性能

技术标准	品种	状态	δ或d /mm	取样方向	室温性能 σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5 /%	ψ/%	α/(°)
					≥				
GB/T 3621	板材	M	0.5～1.0	LT	680	585	20	—	60
			1.1～2.0				15	—	60
			2.1～5.0				12	—	60
			5.1～10.0				12	—	—
GB/2965	棒材	M	10.1～40.0	L	685	585	13	25	—
			～80		680	585	15	40	
QB	大锻件	M	1 000	—	650	600	13	25	—

2）室温及各种温度下的力学性能

① 各种温度下的拉伸性能见表7.2-40。

表7.2-40　TA5钛合金各种温度下的拉伸性能

品种	δ/mm	状态	T/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
板材	12	M	20	700	650	15	40
			200	550	460	16	40
			300	450	380	15	50
			400	400	300	16	58
			500	380	300	13	58
			600	320	250	32	74

② 不同产品退火后的拉伸性能见表7.2-41。

表7.2-41　TA5钛合金不同产品退火后的拉伸性能

品种	规格/mm	状态	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%	a_k /J·cm^{-2}
板材	δ12	M	>700	>650	15	40	—
	δ20		720	630	18	32	75
	δ37		730	610	16	30	70
锻件	Φ160	M	730	670	21	41	64.6
			700	630	19	37	80.3
	Φ120	M	710	630	23	39	59.4
			715	635	21	40	67.1
	ϕ1 300/ϕ900×150	M	720	670	18	34	68
	ϕ1 040/ϕ250	M	690	—	12	34	77

③ 不同轧制和退火工艺板材的拉伸性能见表7.2-42。

表7.2-42　TA5钛合金不同轧制和退火工艺板材的拉伸性能

品种	δ/mm	状态	退火温度/℃	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5/%	ψ/%
板材	12	正常热轧	700	765	680	18	46
			750	770	670	18	43
			800	765	665	17	42

续表7.2-42

品种	δ/mm	状态	退火温度/℃	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5/%	ψ/%
板材	12	正常热轧	850	768	660	18	42
		β热轧	700	780	720	16	36
			750	782	722	16	30
			800	770	705	17	35
			850	780	725	17	37

④ 冲击性能　室温冲击韧性见表7.2-43。

表7.2-43　TA5钛合金室温冲击韧度

品种	状态	δ或d/mm	取样方向	a_{KU}/J·cm^{-2}
棒材	M	12	L	60
板材			LT	70

不同退火温度对冲击性能的影响见图7.2-1。不同温度的冲击性能见图7.2-2。

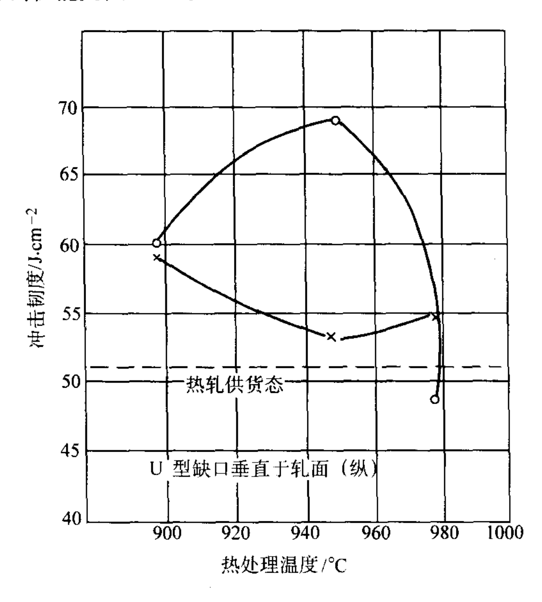


图7.2-1　不同退火温度对TA5合金冲击性能的影响

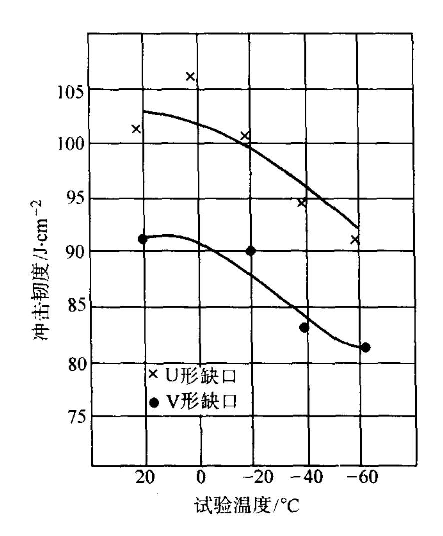


图7.2-2　不同温度下TA5合金的冲击性能

3）疲劳性能　TA5 合金的低周疲劳曲线见图 7.2-3，裂纹扩展速率见图 7.2-4，缺口敏感性见图 7.2-5。

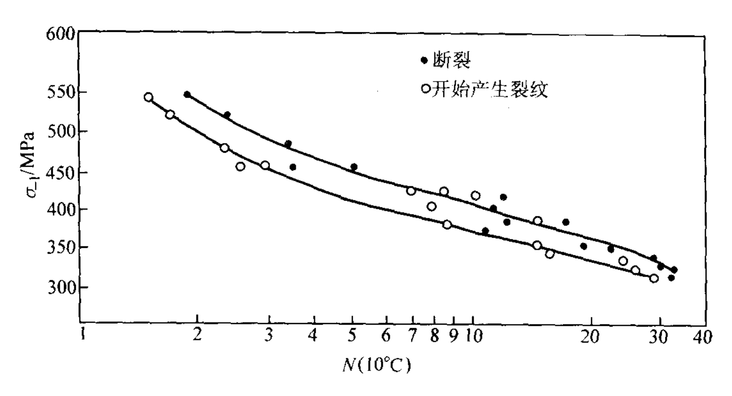


图 7.2-3　TA5 钛合金的低周疲劳曲线

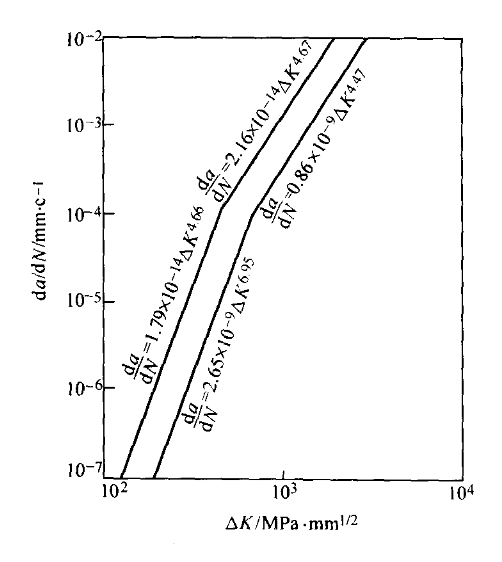


图 7.2-4　TA5 钛合金厚板的裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}-\Delta K$ 曲线

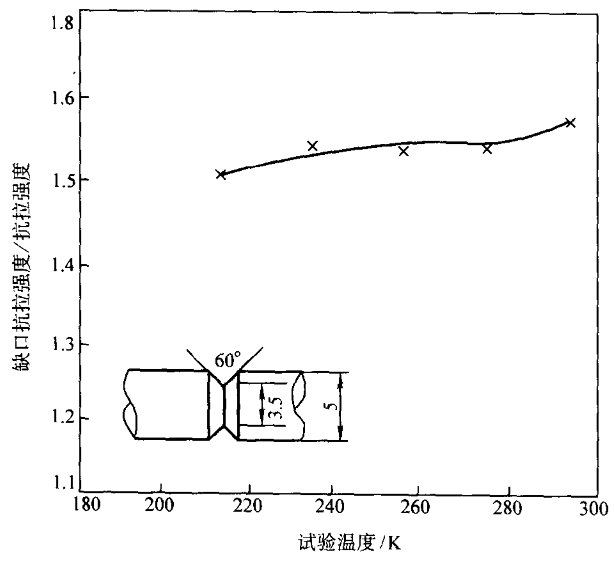


图 7.2-5　TA5 钛合金缺口敏感性与温度的关系

4）弹性性能　TA5 合金的弹性模量见表 7.2-44。

表 7.2-44　TA5 钛合金的弹性模量

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600	700	800
E/GPa	126	129	119	107	104	98	91	85	79

2.5　制造工艺和性能

（1）热处理工艺和性能

普通工艺退火参数为：700～850℃，0.5～2 h，空冷。

去应力退火工艺参数为：550～650℃，0.5～4 h，空冷。

（2）热变形工艺和性能

1）不同温度的拉伸性能见表 7.2-45。

表 7.2-45　TA5 钛合金不同温度下的拉伸性能

温度/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
600	320	250	32	74
700	160	140	56	—
800	68	61	68	—
850	53	49	70	—
900	37	32	65	—
950	21	20	61	—

2）热变形工艺规范见表 7.2-46。

表 7.2-46　TA5 钛合金热变形工艺规范

锻造类型	加热温度/℃	终锻温度/℃	每火变形量/%
铸锭开坯	1 150～1 080	850	40～50
坯料锻造　≤100 mm	1 050～980	800	50～70
＞100 mm	1 050～950	800	50～60
压力机模锻	1 000～950	750	30～60
锻锤模锻	1 000～950	800	30～50

（3）焊接性能

TA5 钛合金具有优良的焊接性能，可进行氩弧焊和电子束焊等。TA5 合金的焊缝和焊接头力学性能见表 7.2-47。

表 7.2-47　TA5 合金的焊缝和焊接接头的力学性能

板厚/mm	填充焊丝	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	a_k/J·cm^{-2}	r/(°)	备注
14	TA4	680	580	12	42	100	69	焊缝
	TA5	780	690	12	28	71	67	焊缝
	TA4	690	580	7.3	37	—	—	焊接头
	TA5	710	630	12	37	—	—	焊接头

2.6 选材及应用

TA5合金可用作海水腐蚀环境下的结构材料，目前已经成功地应用于造船工业。舰船上应用的部位主要有耐压壳体、鱼雷发射装置、动力装置等。除此之外，由于该合金具有一定的强度和优良的耐蚀性能，还可以广泛地应用于化工及其它耐蚀工程。

3 TA7（TA7ELI）钛合金

TA7合金是一种中等强度的α型单相钛合金，含有5%α稳定元素铝和2.5%中性元素锡。该合金不能通过热处理强化，通常是在退火状态下使用，在室温和高温下具有良好的断裂韧度。它的工艺塑性较低，板材成形应在加热状态进行，其特点是耐热强度较好。该合金还具有很好的熔焊性能，适用惰性气体保护下的钨电极和金属电极熔焊工艺。

TA7合金可用于制造机匣壳体、壁板等零件。该合金长期工作温度可达500℃，短时工作温度可达800℃。低间隙杂质元素的TA7ELI合金适合于低温下使用。生产的半成品有板材、棒材、饼材和环形件等，还可用于生产铸件。

1）材料牌号 TA7，TA7ELI，ZTA7。

2）相近牌号 Ti-5Al-2.5Sn（美国），Ti-5Al-2.5Sn ELI（美国），BT5-1（俄罗斯），IMI-317（英国）。

3.1 化学成分

GB/T 3620.1—1994《钛及钛合金牌号和化学成分》、GB/T 3623—1998《钛及钛合金丝》、GB/T 15073—1994《铸造钛及钛合金牌号和化学成分》、GJB 2896—1997《钛及钛合金熔模精密铸件规范》和HB 5448—1990《钛及钛合金熔模精密铸件》规定的化学成分见表7.2-48。

表7.2-48 TA7钛合金的化学成分（质量分数） %

牌号	合金元素			杂质≤							
	Al	Sn	Ti	Fe	Si	C	N	H	O	其他元素③	
										单个	总和
TA7	4.0~6.0	2.0~3.0	余量	0.50	—	0.10	0.05	0.015	0.20	0.10	0.40
TA7ELI	4.50~5.75	2.0~3.0	余量	0.25	—	0.05	0.035	0.0125	0.12	0.05	0.30
TA7（焊丝）	4.0~6.0	2.0~3.0	余量	0.45	—	0.05	0.05	0.012	0.15	0.10	0.40
ZTA7	4.0~6.0①	2.0~3.0	余量	0.50②	0.15	0.10	0.05	0.015	0.20②	0.10	0.40

① HB 5448—1990规定Al=4.0%~5.5%。
② GJB 2896—1997和HB 5448—1990规定Fe≤0.30%，O≤0.15%。
③ 产品出厂时供方可不检验其他元素，用户要求并在合同中注明时可予以检验。

3.2 物理及化学性能

1）密度 $\rho=4.42\ g/cm^3$。

2）熔化温度范围为1 540~1 650℃。

3）热导率见表7.2-49。

表7.2-49 TA7钛合金的热导率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600	700	800
$\lambda/W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	8.8	9.6	10.9	12.2	13.4	14.7	15.9	17.2	18.4

4）比热容见表7.2-50。

表7.2-50 TA7钛合金的比热容

θ/℃	100	200	300	400	500	600	700	800
$c/J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$	503	545	566	587	628	670	712	796

5）线胀系数见表7.2-51。

表7.2-51 TA7钛合金的线胀系数

θ/℃	20~100	20~200	20~300	20~400	20~500	20~600	20~700	20~800	20~900
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	8.5	8.9	9.1	9.3	9.5	9.6	9.7	10.1	10.5

θ/℃	100~200	200~300	300~400	400~500	500~600	600~700
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	9.3	9.7	10.0	10.3	10.5	11.0

6）电性能 电阻率见表7.2-52。

表7.2-52 TA7钛合金的电阻率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
$\rho/\mu\Omega\cdot m$	1.38	1.69	1.75	1.80	1.84	1.87	1.88

7）磁性能 无磁性。

8）抗氧化性能 与工业纯钛和TC4合金相近。

9）耐腐蚀性能 TA7合金在大气条件下和海水中稳定。该合金与TC4合金比较，对热盐应力腐蚀更敏感，合金在人造海盐重度覆盖的环境中，并在316℃和207 MPa应力下暴露100 h时会产生应力腐蚀。

3.3 相变及显微组织

1）相变温度 β↔α+β相的转变温度为1 040~1 090℃；α↔α+β相的转变温度为930~970℃。

2）显微组织 合金低于α↔α+β转变温度（950℃左右）时的平衡组织是单相α；当合金从α+β相区上部（例如1 010℃）快速冷却时，可以得到α′和少量的α相；从β相区快冷可以得到α′相。退火过程中α′相逐渐分解转变成α相。

3.4 力学性能

1）技术标准规定的性能见表7.2-53。

2）硬度见表7.2-54。

3）拉伸性能见表7.2-55。

表 7.2-53　技术标准规定的 TA7 钛合金性能

技术标准	品种	状态	δ 或 d /mm	取样方向	室温						350℃		500℃	
					σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%	α /(°)	a_{KU} /kJ·m^{-2}	σ_b	σ_{100}	σ_b	σ_{100}
											MPa			
						≥								
GB/T 3621—1994	板材	退火	0.8~1.5 1.6~2.0 2.1~5.0 5.1~10.0	LT	735~930	685	20 15 12 12	—	50 50 40 —	—	490	440	440	195
GB/T 6612—1986	板材	退火	0.8~1.5 1.6~2.0 2.1~10.0	LT	≥765	685	20 15 12	—	50 50 40	—	490	440	440	195
GJB 2505—1995	板材 （带材）	退火	0.8~1.5 1.6~2.0 2.1~5.0 5.1~10.0	LT （L）	765~930	685	20 15 12 12	—	50 50 40 —	—	490	440	440	195
GB/T 3623—1998	丝材①	退火	0.1~7.0	L	实测	—	实测	—	—	—	—	—	—	—
GB/T 2965—1996	棒材	退火	8~90	L	≥785	680	10	25	—	—	490	440	—	—
GJB 2218—1994	棒材	退火	21~100	L	≥785	730	10	25	—	—	—	—	—	—
GJB 2218—1994	环坯	退火	δ38~110 δ>110~270	C	≥785 ≥785	730 —	10 8	25 23	— —	— —	— —	— —	— —	— —
GJB 2220—1994	环坯	退火	δ60~270 m≤80 kg	C	≥785	—	10	25	—	295	460	440	—	—
GJB 2744—1996	自由锻件、模锻件	退火	m≤60 kg	L②	785	—	10	25	—	295	460③	440	—	—
HB 7238—1995	环形锻件	退火	m≤80 kg	C	785	—	10	25	—	295	460	440	—	—
GB/T 6614—1994	铸件	退火或热等静压	—	—	795	725	8	—	—	—	—	—	—	—
GJB 2896—1997	精密铸件	退火或热等静压	—	附铸试样④	760	700	5	12	—	—	410⑤	400⑤	—	—
HB 5448—1990	精密铸件	退火或热等静压	—	附铸试样④	760	700	5	12	—	—	—	—	—	—

注：GJB 2220—1994、GJB 2744—1996 和 HB 7238—1995 规定室温 HBS 为 d = 3.4~3.9 mm。GB/T 6614—1994 规定室温 HBS≤335。

① 焊丝不检验力学性能。

② 采用横向或短横向试样测得的室温 δ_5 和 ψ 值允许比规定的纵向值低 20%。

③ 规定 350℃的 δ_5≥15%，ψ≥40%。

④ 从铸件上切取试样的室温力学性能，允许比附铸试样的性能低 5%。

⑤ 试验温度为 300℃。

表 7.2-54　TA7 钛合金的硬度

品种	状态	θ/℃	δ 或 d/mm	HBS
棒材	退火	20	30~60	286
棒材	退火	20	250	277
环形件	退火	20	535/350×112	280

表 7.2-55　TA7 钛合金的拉伸性能

品种	δ 或 d /mm	状态	取样方向	θ /℃	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
板材	≤3	退火	LT	20	834	735	13	—
				250	588	510	13	—
				350	539	471	10	—
				400	529	451	10	—
				500	471	392	9	—

续表 7.2-55

品种	δ 或 d /mm	状态	取样方向	θ /℃	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
棒材	22	退火	L	-70	950	—	14.8	42.5
				20	827	778	20.0	42.2
				100	715	652	20.8	49.1
				200	626	544	22.8	54.9
				300	552	436	23.8	53.7
				350	520	407	28.0	54.9
				400	496	402	24.8	55.5
				500	464	353	23.7	53.1
				600	398	294	55.2	62.3
				700	252	217	86.2	82.2
TA7ELI 棒材	—	退火	—	-253	1 324~1 569	1 275~1 471	8	16
				-196	1 177~1 324	1 157~1 236	15	25

4）压缩性能见表7.2-56。

表7.2-56 TA7钛合金的压缩性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_{bc}/MPa	$\sigma_{Pc0.2}$/MPa
棒材	22	退火	L	20	1 389	839

5）冲击性能见表7.2-57。

表7.2-57 TA7钛合金的冲击性能

品种	d或δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	a_{KU}/kJ·m^{-2}
棒材	30~60	退火	L	20	668
棒材	250		T		688
环形件	535/350×112		C		682

6）扭转性能见表7.2-58。

表7.2-58 TA7钛合金的扭转性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	τ_b	$\tau_{P0.3}$	$\tau_{P0.01}$	扭转角/(°)
					MPa			
棒材	22	退火	L	20	839	537	488	1 045

7）剪切性能见表7.2-59。

表7.2-59 TA7钛合金的剪切性能

品种	状态	取样方向	θ/℃	τ/MPa
棒材	退火	L	20	598

8）承载性能见表7.2-60。

表7.2-60 TA7钛合金的承载性能

品种	δ/mm	状态	θ/℃	e/D	σ_{bru}/MPa		σ_{bry}/MPa	
					A①	B②	A①	B②
板材	0.4~2.0	退火	20	1.5	1 150	1 235	915	960
				2.0	1 725	1 850	1 310	1 365
	2.1~4.7	退火	20	1.5	1 150	1 260	915	980
				2.0	1 725	1 895	1 310	1 400

① 置信度95%，存活率99%。②置信度95%，存活率90%。

9）热稳定性见表7.2-61。

表7.2-61 TA7钛合金的热稳定性

品种	d/mm	状态	取样方向	热暴露条件 θ/℃	热暴露条件 t/h	σ_b	$\sigma_{P0.2}$	δ_5	ψ
						MPa		%	
棒材	22	退火	L	未暴露		827	778	20.0	42.2
				350	100	837	—	19.2	42.0
棒材	—	退火	—	未暴露		784	—	12	34
				350	3 000	784	—	11.5	33
				450	3 000	794	—	12	30

10）持久和蠕变性能

① 高温持久性能见表7.2-62。

② 高温蠕变性能见表7.2-63。

11）疲劳性能

表7.2-62 TA7钛合金的高温持久性能

品种	δ/mm	状态	θ/℃	σ_{100}	σ_{500}	$\sigma_{1\,000}$	$\sigma_{2\,000}$
				MPa			
板材	3	退火	250	—	—	578	—
			300	—	—	549	—
			350	—	—	529	—
			400	—	—	382	—
			450	—	—	255	—
			500	—	—	167	—
棒材	≤100	退火	250	588	—	—	—
			300	559	—	—	—
			350	539	—	—	—
			400	461	392	—	363
			450	324	275	—	225
			500	245	196	—	147
			550	147	—	—	—

表7.2-63 TA7钛合金的高温蠕变性能

品种	δ或d/mm	状态	θ/℃	$\sigma_{0.2/100}$/MPa
板材	3	退火	250	490
			300	441
			350	373
			500	49
棒材	≤100	退火	400	373
			450	196
			500	78

① 高周疲劳 旋转弯曲疲劳极限见表7.2-64。

表7.2-64 TA7钛合金的旋转弯曲疲劳极限

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	N/周	σ_D/MPa
棒材	22	退火	L	20	1	-1	10^7	392
				350	1			324
				350	1.97			147

② 低周疲劳 应力控制低周疲劳性能见表7.2-65。

表7.2-65 TA7钛合金的应力控制低周疲劳性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	f/Hz	K	σ_{max}/MPa	N/周
棒材	22	退火	L	20	2.4	0.1	0.2	0.9	989	598
								0.8	879	1 057
								0.7	734	2 846
								0.6	659	5 683
								0.5	549	12 843

12）弹性性能

① 拉伸弹性模量见表7.2-66。

表7.2-66 TA7钛合金的拉伸弹性模量

品种	板材			
δ/mm	≤3			
状态	退火			
θ/℃	20	250	350	500
E/GPa	112.8	93.2	83.4	71.6

② 动态弹性模量见表7.2-67。

表7.2-67　TA7钛合金的动态弹性模量

品种	棒材									
d/mm	22									
状态	退火									
θ/℃	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
E_D/GPa	123	121	113	109	100	96	88	82	77	74

③ 切变模量见表7.2-68。

表7.2-68　TA7钛合金的切变模量

品种	棒材				
d/mm	≤100				
状态	退火				
θ/℃	20	400	600	700	800
G/GPa	44.1	38.2	34.3	32.2	29.4

④ 泊松比见表7.2-69。

表7.2-69　TA7钛合金的泊松比

品种	棒材				
d/mm	≤100				
状态	退火				
θ/℃	20	400	600	700	800
μ	0.33	0.43	0.45	0.45	0.50

3.5　制造工艺和性能

1）熔炼与铸造工艺　铸锭应经过两次以上真空自耗电弧炉熔炼。合金元素Al和Sn以Al-Sn中间合金方式加入。自耗电极的焊接采用氩气保护等离子焊接方法，严禁使用钨极氩弧焊。

铸件采用石墨加工型、捣实石墨型和熔模精铸型壳在真空自耗电弧凝壳炉中进行熔铸。

2）热处理制度

① 退火　板材：700～850℃，10～120 min，空冷。

棒材和锻件：700～850℃，1～4 h，空冷。

② 去应力退火　540～650℃，15～360 min，空冷或炉冷。铸件：600～800℃，1～4 h，空冷或炉冷。

③ 铸件热等静压处理　在100～140 MPa氩气压力下，900～920℃，2～3 h，炉冷至300℃以下。

3）热变形工艺　见表7.2-70。在低于β转变温度下进行最后一火变形时，变形量应大于25%～40%，以获得良好的力学性能。以后如需要再加热时（例如热校正），则应在低于β转变温度以下90℃的温度进行。不同变形速率下的变形抗力见表7.2-71。热变形温度下的拉伸性能见表7.2-72。

表7.2-70　TA7钛合金的热变形工艺规范

锻造类型	加热温度/℃	终锻温度/℃	一火变形量/%
铸锭开坯	1 180	≥900	30～50
毛坯预变形	1 100	≥850	40～70
锻锤模锻	1 020～1 100	≥900	40～70
压力机模锻	1 020	≥850	40～70

表7.2-71　TA7钛合金不同变形速率下的变形抗力

变形温度/℃	以下变形速率（s^{-1}）的最大变形抗力/MPa			
	10^{-2}	10^{-1}	1	10
800	222	320	365	452
900	205	262	285	313
1 000	80	93	105	117
1 100	35	59	65	80

表7.2-72　TA7钛合金热变形温度下的拉伸性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%
棒材	22	退火	L	700	252	86.2	82.2
				800	160	140.8	95.6
				850	121	140.0	94.0
				900	88	170.0	96.5
				1 000	35	78.0	93.0

4）弯曲性能见表7.2-73。

表7.2-73　TA7钛合金的弯曲性能

品种	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	$\alpha(D=3\delta)$/(°)
板材	0.8～2.0	退火	LT	20	≥50

5）焊接工艺　该合金具有良好的焊接性能，采用惰性气体保护的钨电极熔焊（TIG）或金属电极熔焊（MIG）可使合金在低温下具有高韧性。由于钎焊会产生与金属间化合物有关的脆性，所以一般采用氩弧焊、点焊和缝焊。

氩弧焊接头的室温、高温和低温的强度系数均较高；缝焊接头的室温、高温的强度系数较高，但低温强度系数较低。

① 点焊工艺见表7.2-74。

表7.2-74　TA7钛合金的点焊工艺

焊接材料	δ/mm	焊前状态	球面电极半径/mm	规范参数			核心尺寸	
				I/A	t_h/s	P_j/N	d/mm	η_t/%
板材	1.0	800℃，30 min，空冷＋酸洗	100	6 500～7 000	0.18	3 678	6.0	82
	1.5			8 100	0.22	4 658	7.0	81
	1.8			9 000	0.26	6 669	8.0	78

② 自动钨极氩弧焊规范见表7.2-75。

表7.2-75　TA7钛合金的自动钨极氩弧焊规范

焊接材料	δ/mm	焊前状态	焊丝牌号	接头型式	I/A	U/V	v/m·min^{-1}	Q/L·min^{-1}	Q_b/L·min^{-1}	d_W/mm	D_z/mm
板材	1.2	800℃，30 min，空冷＋酸洗	不加焊丝	对接	55～60	8～9	0.25	10～11.5	2～5或铜垫	1.5	18
	1.5				98	9		11～12		1.5	
	2.0				130	9		11～12		2.0	

③ 自动氩弧焊焊接接头力学性能见表 7.2-76。

表 7.2-76　TA7 钛合金自动氩弧焊焊接接头力学性能

焊接材料	δ/mm	填充材料	焊后热处理	θ/℃	σ_b/MPa	α/(°)
板材	≤3	无填料	550℃退火 0.5~4 h	20	735~804	50~60
				350	490	—
				500	441	—

3.6 选材及应用

采用 TA7 合金模锻件和环形件制成的发动机转接座、前机匣壳体、封严圈壳体以及板材热压成形的衬板、支架座和壁板等零件，已用于航空工业。由于该合金具有优良的耐腐蚀性能，特别适用于制造船舶零部件。

4 TA9 钛合金

TA9（Ti-0.2Pd）钛合金是在工业纯钛中加入少量的贵金属钯制成的α型钛合金，钯的加入不仅显著提高了合金在还原性介质中的耐蚀性，也改善了其在氧化性介质中的耐蚀性。在高温、高浓度的各种含氯化物介质中，TA9 合金的抗缝隙腐蚀能力是最佳的。TA9 还具有与工业纯钛各牌号相似的各种性能，因此该合金在化工，特别是石化部门得到广泛的应用。由于 Pd 的加入提高了钛材的成本，因此，TA9 是在工业纯钛不能满足使用要求的条件下被选用。TA9 合金的主要产品有板材、棒材、管材、锻件和丝材等。

1）材料牌号　TA9。

2）相近牌号　Gr.7、Gr.11（美国）。

4.1 化学成分

GB/T 3620.1—1994《钛及钛合金牌号和化学成分》规定的化学成分见表 7.2-77。

表 7.2-77　TA9 钛合金化学成分（质量分数）%

合金元素		杂质≤						
Ti	Pd	Fe	C	N	H	O	其他元素 单个	其他元素 总和
余量	0.12~0.25	0.25	0.10	0.03	0.015	0.20	0.10	0.40

4.2 物理及化学性能

1）密度 $\rho = 4.52$ g/cm³。

2）熔化温度约 1 665℃ ± 5℃。

3）热导率见表 7.2-78。

表 7.2-78　TA9 钛合金的热导率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
λ/W·m^{-1}·K^{-1}	16.4	16.7	17.1	17.4	17.7	17.9	18.2

4）比热容见表 7.2-79。

表 7.2-79　TA9 钛合金比热容

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
c/J·kg^{-1}·K^{-1}	523	691	617	584	578	585	604

5）线胀系数见表 7.2-80。

表 7.2-80　TA9 钛合金线胀系数

θ/℃	100	200	300	400	500
α_1/10^{-6}·K^{-1}	9.24	9.48	9.29	9.28	9.10

6）电阻率见表 7.2-81。

表 7.2-81　TA9 钛合金电阻率

θ/℃	20	100	200	300	400	500
ρ/μΩ·m	0.55	6.5	8.5	10.0	11.5	—

7）磁性能　无磁性。

8）抗氧化性能与工业纯钛相似。

9）耐腐蚀性能

① 钯对钛耐蚀性的影响　图 7.2-6、图 7.2-7 说明了 Pd 的加入量对钛在硫酸、盐酸中耐蚀性的影响。由图可见，当钛中加入 Pd 的量达到 0.1%~0.2%时，钛在硫酸、盐酸中的腐蚀率明显降低，进一步增加 Pd 的含量，合金的腐蚀率几乎不变。而当 Pd 含量低于 0.05%时，腐蚀率反而增加。在酸浓度较低时，含 0.13%Pd 的钛钯合金已具有满意的耐蚀性，但是当酸浓度较高时，Ti-0.2Pd 具有更好的耐蚀性，因而用 Ti-0.2Pd 更为适宜。

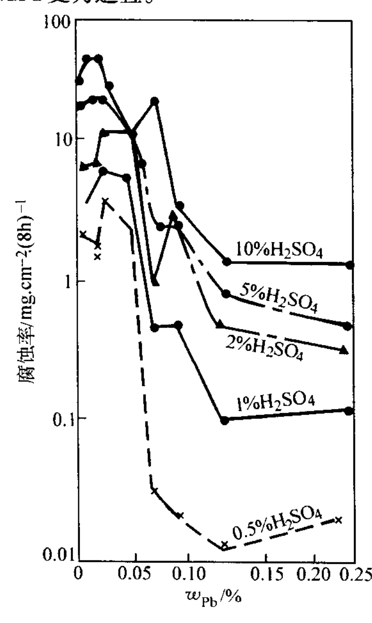


图 7.2-6　钯对钛在沸腾酸中的耐蚀性的影响

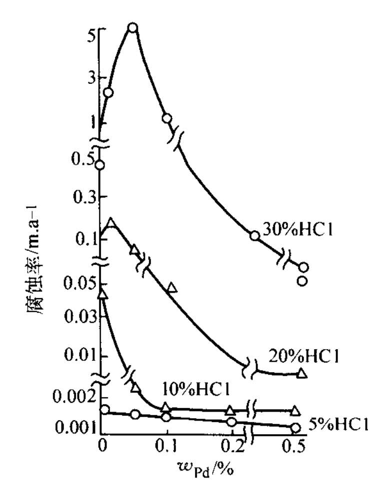


图 7.2-7　钯含量对钛在 25℃ 5%~30%HCl 腐蚀率的影响

② TA9合金在硫酸、盐酸等介质中的耐蚀性　TA9合金的耐蚀性见表7.2-82与表7.2-83。表中的数据显示了TA9合金在硫酸、盐酸、磷酸及某些介质中的腐蚀率，表7.2-84比较了纯钛与TA9的耐蚀性。

表7.2-82　TA9钛合金的耐蚀性

介质	浓度(质量分数)/%	温度/℃	腐蚀率/mm·a^{-1}
$AlCl_3$	10 25	沸腾	0.025 0.025
$CaCl_2$	73	177	0
柠檬酸	50	沸腾	0.025
甲酸	50	沸腾	0.08
草酸	1	沸腾	1.14
H_3PO_4	10	沸腾	0.13

表7.2-83　TA9钛合金在硫酸、盐酸中的耐蚀性

介质	浓度（质量分数）/%	温度/℃	腐蚀率/mm·a^{-1}		
			氮饱和	氧饱和	空气饱和
H_2SO_4	5	室温	0.025	—	—
	10	室温	0.025	—	—
	40	室温	0.23	—	—
	60	室温	0.86	—	—
	80	室温	16.38	—	—
	96	室温	1.73	—	—
	5	70	0.15	—	0.08
	10	70	0.25	—	0.10
	40	70	2.21	—	0.94
	60	70	4.67	—	9.96
	80	70	5.74	—	11.35
	96	70	1.57	—	2.11
	1	190	0.13	0.13	—
	5	190	0.13	0.08	—
	10	190	0.13	0.13	—
	20	190	3.94	1.50	—
	30	190	—	61.98	—
	5	沸腾	—	—	0.51
	10	沸腾	—	—	1.50
	20	沸腾	—	—	5.26

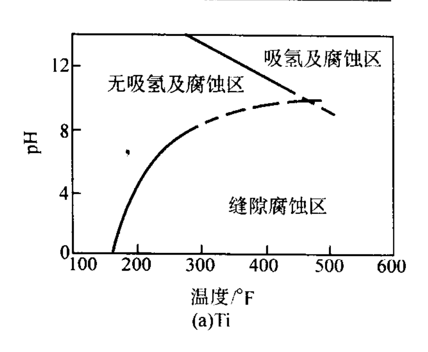
续表7.2-83

介质	浓度（质量分数）/%	温度/℃	腐蚀率/mm.a^{-1}		
			氮饱和	氧饱和	空气饱和
HCl	1～15	室温	0.025	—	—
	20	室温	0.10	—	—
	25	室温	0.28	—	—
	1	70	0.08	0.025	—
	5	70	0.08	0.025	—
	10	70	0.18	0.05	—
	15	70	0.33	0.15	—
	20	70	1.55	0.66	—
	25	70	4.29	1.98	—
	3	190	0.025	—	0.13
	5	190	0.10	—	0.13
	10	190	8.89	—	9.35
	15	190	41.15	—	—

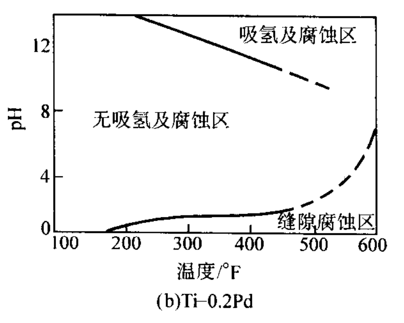
表7.2-84　TA9钛合金与纯钛耐蚀性的比较

介质	浓度（质量分数）/%	温度/℃	腐蚀率/mm·a^{-1}	
			TA9	纯钛
HCl	5	25	<0.01	0.08
	5	沸腾	0.18	25
	10	25	<0.01	0.20
	10	沸腾	0.5	>25.0
	15	沸腾	0.75	<25.0
	20	25	0.13	0.75
H_2SO_4	5	25	<0.01	0.13
	10	25	<0.01	0.23
	40	25	0.20	1.8
H_3PO_4	5	沸腾	0.31	5.3
$AlCl_3$	25	沸腾	<0.01	>25.0

③ TA9合金在氯化物中的耐蚀性　图7.2-8为TA9合金在氯化钠溶液中抗缝隙腐蚀情况。从图中可以看出，TA9合金无吸氢、无腐蚀区明显扩大，而缝隙腐蚀区明显缩小。因此，TA9合金的抗缝隙腐蚀性能优于纯钛。TA9合金在更高的温度下仍具有抗缝隙腐蚀能力，例如，纯钛在3%的NaCl中使用到170℃就发生缝隙腐蚀，而TA9合金的使用温度达到250℃时未发生缝隙腐蚀。



(a)Ti



(b)Ti-0.2Pd

图7.2-8　TA9合金在氯化钠溶液中抗缝隙腐蚀

④ 缓蚀剂对TA9合金耐蚀性的影响　表7.2-85为某些缓释剂对TA9合金耐蚀性的影响。从表中可以看出，与纯钛一样，TA9合金可通过缓蚀剂来提高其在还原性介质中的耐蚀性，且所需的缓蚀剂的浓度比纯钛更低。

表7.2-85　缓蚀剂对TA9合金耐蚀性的影响

介质	缓蚀剂	温度/℃	腐蚀率/mm·a⁻¹
10% H_2SO_4	16g/L $Fe_2(SO_4)_3$	沸腾	0.025
20% H_2SO	16g/L $Fe_2(SO_4)_3$	沸腾	0.15
40% H_2SO	40g/L $Fe_2(SO_4)_3$	沸腾	2.21
30% H_2SO	0.05% Cu SO_4	沸腾	33.27
30% H_2SO	0.50% Cu SO_4	沸腾	2.01
30% H_2SO	1.0% Cu SO_4	沸腾	1.75
5% H_2SO	Cl_2 饱和	190	0.025
10% H_2SO	Cl_2 饱和	190	0.05
20% H_2SO	Cl_2 饱和	190	0.41
10% HCl	16g/L $FeCl_3$	沸腾	0.08
20% HCl	16g/L $FeCl_3$	沸腾	2.87
10% HCl	6g/L $FeCl_3$	沸腾	0.13
20% HCl	6g/L $FeCl_3$	沸腾	3.71
5% HCl	Cl_2 饱和	沸腾	0.025

10）TA9合金的弹性性能　见表7.2-86。

表7.2-86　TA9合金的弹性性能

弹性模量 E /GPa	压缩模量 E_C /GPa	切变模量 G /GPa	泊松比 μ
103～107	110	45	0.34～0.40

4.3　相变及显微组织

1）相变温度　α+β↔β相的转变温度为913℃±15℃。

2）显微组织　与工业纯钛（TA2）相同，从β相区缓慢冷却后为单相α组织。当从β相区快速冷却时可以得到针状α组织。

4.4　力学性能

1）技术标准规定的性能见表7.2-87。

2）室温及各种温度下的力学性能。

① 硬度　HB=200（退火状态）。

② 拉伸性能　各种温度下的拉伸性能见表7.2-88。

TA9合金不同产品的室温性能见表7.2-89。

不同温度空气退火后的拉伸性能见表7.2-90。

3）持久性能　TA9合金的高温持久性能见表7.2-91。

表7.2-87　技术标准规定的TA9钛合金性能

技术标准	品种	状态	δ 或 d/mm	取样方向	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	α/(°)
					≥				
GB/T 3621—1994	板材	退火	0.8～2.0 2.1～5.0 5.1～10.0	LT	370～530	250	30 25 25	— — —	140 130 —
GB/T 3622—1999	带、箔材	退火	0.3～<0.5 0.5～2.0	LT (L)	370～530	250	25② 30	— —	140
GB/T 3623—1996	丝材①	退火	0.1～7.0	L	—	—	—	—	—
GB/T 3624—1995	管材	退火	—	L	370～530	250	20②	—	—
GB/T 3625—1995	管材	退火	—	L	370～530	250	20②	—	—
GB/T 2965—1996	棒材	退火	—	L	370	250	20	30	—
GB/T 16598—1996	饼环材	退火	≤100	L	370	250	20	30	—

①　丝材不检验力学性能；

②　为 δ_{50} 的数据。

表7.2-88　TA9钛合金各种温度下的拉伸性能

温度/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%
室温	570	—	35
200	295	—	58
300	185	—	80
400	145	—	74
500	135	—	—

4）切变模量见表7.2-92。

4.5　制造工艺和性能

该合金的工艺性能（包括热、冷压力加工成形、冲压成形和钣金成形、焊接和机械加工等）均与纯钛相似。

1）热处理工艺和性能　由于TA9合金的组织为α单相，因此，合金不能进行热处理强化。其热处理包括消除应力退火和再结晶退火（完全退火），推荐制度见表7.2-93。

表7.2-89　TA9合金不同产品的室温性能

产品	规格/mm	状态	室温性能 σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	α/(°)
棒材	ϕ70	M	460 465	320 330	31 32	60 57	—
棒材	ϕ5	M	560 560	360 350	31 32	52 49	—
板材	δ8.0	M	445	365	32	—	—
板材	δ2.0	M	440 445	355 355	45 47	—	>140 >140
管材	ϕ57×2.5	M	460 450	325 300	32 31	—	—
管材	ϕ19×1.5	M	465 480	—	31 32	—	—

表 7.2-90 TA9 钛合金板材在不同温度空气退火后的拉伸性能

δ /mm	方向	退火温度 /℃	LT方向室温性能			
			σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	α/(°)
0.8	T	600	395	348	65	>140
		640	385	320	63	>140
		680	370	302	61	>140
		720	372	298	64	>140
		760	367	295	66	>140
		800	388	302	56	>140
	L	600	398	315	40	>140
		640	390	280	61	>140
		680	382	260	60	>140
		720	372	248	64	>140
		760	370	250	66	>140
		800	400	272	50	>140

表 7.2-91 TA9 钛合金的高温持久性能

处理	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%
300℃/100 h	545	425	35.0

表 7.2-92 钛合金切变模量

品种	板材					
δ/mm	0.8					
热处理状态	退火					
取样方向	LT					
θ/℃	20	100	200	300	400	500
G/GPa	44	42	39	36	34	31

表 7.2-93 TA9 合金推荐的热处理制度

热处理	温度/℃	时间/h	冷却方法
消除应力	480~595	15 min~4 h	AC 或 FC
完全退火	650~760	6 min~2 h	AC 或 FC

2）热变形工艺和性能 热变形工艺规范见表 7.2-94。

表 7.2-94 TA9 钛合金热变形工艺规范

锻造类型	加热温度/℃	终锻温度/℃	每火变形量/%
铸锭开坯	1 050~1 100	850	40~50
坯料锻造 ≤100 mm	950~900	800	50~60
>100 mm	950~900	800	50~70
压力机模锻	950~900	750	50~70
锻锤模锻	980~900	800	50~70

4.6 选材及应用

TA9 合金主要应用于稀盐酸、稀硫酸、稀磷酸环境，也广泛用于钛设备以防止缝隙腐蚀。如应用于稀盐酸、硫酸、磷酸环境的由 TA9 合金制成的列管式换热器，在纺织工业中用作喷丝头等的零部件，在乙醛装置中大量制造钛设备法兰衬环与菱形垫片等，在其他的装置中也采用 TA9 制造法兰和接头等有缝隙的零部件。此外，该合金也用作 $C_2H_2Cl_2$ 的结构材料。

在硝酸生产中也采用 TA9 制造设备。对于氧化性与还原性条件交替出现的环境也宜用 TA9 合金。将这一合金用于密封面时，可在密封面上堆焊 0.2 mm。如在 135℃ 的 27% NH_4Cl + 6.4%NaCl 溶液中使用 TA9 合金，用这种方法可有效防止钛设备发生缝隙腐蚀。

5 TA16 钛合金

TA16（Ti-2Al-2.5Zr）合金是一种低强度、高塑性、耐蚀性能好的 α 型钛合金，它含有 2%Al 和 2.5%Zr 的 α 稳定元素，使合金得到固溶强化。该合金不能通过热处理强化，通常在退火状态下使用。TA16 合金具有优良的工艺性能、焊接性能和耐蚀性能等，可进行冷、热压力加工（包括管材的冷轧和冷拔加工）、机加工和焊接（包括氩弧焊、电渣焊和接触焊等）。该合金主要应用于管材，其他半成品有板材、锻件、棒材和丝材等。TA16 合金的工作温度可达到 350~400℃，是飞机、舰船及化工等工业部门优良的结构材料，用于制造飞机、发动机各种管道，以及舰船和反应堆换热器等重要结构件，已广泛地应用于宇航、原子能、舰船及其他工业部门。

1）材料牌号 TA16。

2）相近牌号 M-7M（俄罗斯）。

5.1 化学成分

XJ/BS 5159—2001 和 XJ/BS 5244—2002 技术标准规定的化学成分见表 7.2-95 所示。

表 7.2-95 TA16 钛合金化学成分（质量分数） %

合金元素			杂质≤							
Ti	Al	Zr	Fe	Si	C	N	H	O	其他元素	
									单个	总和
基	1.8~2.5	2.0~3.0	0.25	0.12	0.10	0.04	0.006	0.15	0.10	0.30

5.2 物理及化学性能

1）密度 ρ=4.49 g/cm³。

2）热导率见表 7.2-96 所示。

表 7.2-96 TA16 钛合金热导率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
λ/W·m^{-1}·K^{-1}	11.3	12.47	13.86	15.78	17.14	—	—

3）比热容见表 7.2-97 所示。

表 7.2-97 TA16 钛合金比热容

θ/℃	20	100	200	300	400	500
c/J·kg^{-1}·K^{-1}	460	520	585	628	650	—

4）线胀系数见表 7.2-98 所示。

表 7.2-98 TA16 钛合金线胀系数

θ/℃	100	200	300	400	500	600
α/10^{-6}K^{-1}	9.0	9.3	9.5	9.6	9.7	—

5）电阻率见表7.2-99所示。

表7.2-99 TA16钛合金电阻率

θ/℃	20	100	200	300	400	500
ρ/μΩ·m	10.5	11.3	12.8	14.1	15.2	—

6）磁性能 无磁性。

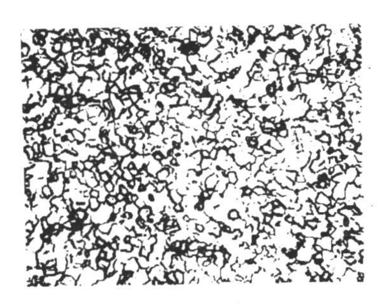
7）抗氧化性能 与工业纯钛相似。

8）耐腐蚀性能 该合金在海水中有较好的耐蚀性能，在酸和其他腐蚀介质中的耐蚀性与纯钛相似，在湿热工况条件下，该材料不出现点蚀和局部腐蚀现象。

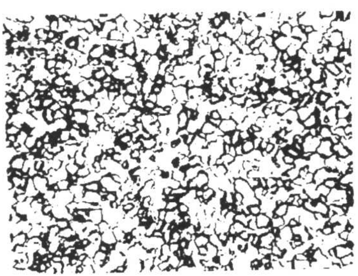
5.3 相变及显微组织

1）相变温度 α+β↔β相的转变温度为920℃±20℃。

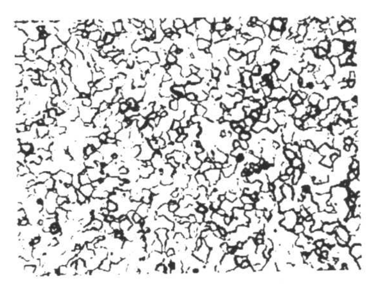
2）显微组织 该合金的典型组织为α型单相组织。随着退火温度的升高和退火时间的加长，α相晶粒尺寸有长大倾向，见图7.2-9。



(a)650℃,1h,AC退火



(b)680℃/1h,AC退火



(c)700℃,1h,AC退火

图7.2-9 显微组织

3）再结晶温度为650~800℃。

5.4 力学性能

1）技术标准规定的性能见表7.2-100所示。

2）室温及各种温度下的力学性能

① 硬度 HV=195~225（板材，200 g/30 s负载下测定）。

② 拉伸性能 各种温度下的拉伸性能见表7.2-101所示。

表7.2-100 TA16技术标准规定的钛合金性能

技术标准	品种	状态	δ或d /mm	取样方向	室温					350℃	
					σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	φ/%	α/(°)	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa
XJ/BS 5159—2001	管材	冷轧+冷拔+退火	<2.0 ≥2.0	L	470~685	≥370	≥24 ≥20	— —	— —	—	—
		热挤+退火	—	L	470~685	≥370	≥18	≥36	—	—	—
XJ/BS 5244—2002	管材	冷轧+冷拔+退火	—	L	470~665	≥375	≥20	—	—	≥245	≥177
XJ/BS	棒、锻件			L	≥470	≥375	≥18	≥30	—	≥235	≥180

表7.2-101 TA16钛合金各种温度下的拉伸性能

品种	规格/mm	状态	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%
管材	(φ6~18)×(0.5~1.5)	退火	20	550~615	430~490	19~29
			100	440~510	350~505	22~31
			200	375~450	270~335	26~35
			300	265~350	220~255	55~56
			350	225~255	210~215	52~53
			400	235~245	180~200	49~53

不同温度真空退火后的拉伸性能见表7.2-102。

不同温度空气退火后的拉伸性能见表7.2-103。

不同产品的拉伸性能见表7.2-104。

③ 冲击性能 室温冲击韧度见表7.2-105。

④ 弯曲性能 室温弯曲角见表7.2-106。

表7.2-102 TA16钛合金不同温度真空退火后的室温拉伸性能

品种	状态	取样方向	退火温度/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%
挤压管	真空退火	L	未退火	615	500	24
			650	575	480	25
			700	580	475	26
			750	580	480	26
			800	570	420	28
冷轧管	真空退火	L	650	540~575	420~450	23~28
			700	525~575	410~460	24~27
			750	500~550	370~430	28
			800	490~520	370~410	29

表 7.2-103　TA16 不同温度空气退火后的室温拉伸性能（不同加工率）

加工率/%	退火温度/℃	室温拉伸性能		
		σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%
38.7	650	630	530	25
		630	525	22
	680	625	510	24
		590	515	24
	700	625	505	22
		620	505	24
55.5	650	595	500	35
		585	500	33
	680	615	510	30
		615	515	30
	700	575	475	33
		575	475	24

表 7.2-104　TA16 不同产品的室温拉伸性能

产品	规格/mm	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	a_k /J·cm^{-2}
锻件	18×30×500	555	415	22	53	72.2
棒材	ϕ29	535	380	26	50	/
		530	385	26	51	/
	ϕ100	550～570	420～430	22～25	46～50	—
管材	ϕ6	570	425	25	—	—
	ϕ8	570	435	28	—	—
	ϕ10	540～555	395～435	22～27	—	—
	ϕ13	610	460	22	—	—
	ϕ16	560～575	435～460	33～42	—	—
	ϕ25	500～515	385～410	37～50	—	—
	ϕ50～90×7～15	515～625	430～505	18～31	36～59	—
板材	δ2.0	580	555	36	—	—
	δ1.0	510～530	490～505	41	—	—

表 7.2-105　TA16 钛合金室温冲击韧度

品种	状态	d/mm	取样方向	℃	a_{KU}/kJ·m^{-2}
棒材	退火	30	L	RT	60～100
				350	120～160

表 7.2-106　TA16 钛合金室温弯曲角

品种	δ/mm	状态	取样方向	$\alpha(D=3\delta)$/(°)
板材	2.0	退火	LT	145

⑤ 缺口敏感系数见表 7.2-107。

⑥ 热稳定性　试样热暴露后的室温力学性能见表 7.2-108。

表 7.2-107　TA16 钛合金棒材在不同温度下的缺口敏感系数

θ/℃	RT	150	250
σ_H/σ_b	1.62	1.55	1.59

表 7.2-108　TA16 钛合金试样热暴露后的室温力学性能

品种	δ /mm	状态	取样方向	热暴露条件		σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_{10} /%	ψ /%
				θ/℃	t/h				
板材	1.0	退火	LT	未暴露		510～530	490～505	41	—
				350	100	580	455	22	—
棒材		退火	L	未暴露					
				350	100	545	425	25	51

3）持久和蠕变性能　高温持久和蠕变性能见表 7.2-109。

表 7.2-109　TA16 钛合金高温持久和蠕变性能

θ/℃	σ_{100}/MPa	$\sigma_{0.2/100}$/MPa
250	275	311
350	235	284
400	175	225

4）疲劳性能　轴向加载疲劳极限见表 7.2-110。

表 7.2-110　TA16 钛合金轴向加载疲劳极限

品种规格	δ /mm	状态	取样方向	θ /℃	K_t	R	f /Hz	N /周	σ_D /MPa
棒	—	退火	L	RT	1	0.1	126	5×10^6	340
					3	0.1	134	5×10^6	130

5）弹性性能

① 室温静态弹性模量见表 7.2-111 所示。

表 7.2-111　TA16 钛合金静态弹性模量

θ/℃	20	100	200	300	400	500
E/GPa	109.8	105.3	98.5	91.3	84.1	—

② 切变模量和泊松比见表 7.2-112 所示。

表 7.2-112　TA16 钛合金切变模量和泊松比

θ/℃	20	100	200	300	400	500
G/GPa	41.8	40.1	37.6	34.8	32.4	—
μ	0.31	0.31	0.31	0.31	0.32	—

5.5　制造工艺和性能

1）热处理工艺和性能

① 普通退火　薄壁管、薄板材和板材零件：650～830℃，0.25～2 h，空冷。

厚壁管、棒材和锻件：700～850℃，0.5～2 h，空冷。

② 真空退火　650～800℃，1～3 h，炉冷至 200℃以下允许出炉空冷。炉内绝对压强应不大于 9×10^{-2} Pa。

③ 去应力退火　去除零件冲压成形、焊接和机械加工时形成的内应力退火：500℃～650℃，0.5～2 h，空冷。去

应力退火可以在空气炉或真空炉中进行。

2）热变形工艺和性能 该合金的工艺性能（包括热、冷压力加工成形，冲压和钣金成形，焊接和机械加工等）与工业纯钛的（TA2）相似。

① 不同温度下的工艺性能 见表7.2-113所示。

表7.2-113 TA16钛合金不同温度下的工艺性能

温度/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	φ/%	a_K/J·cm^{-2}
室温	600~700	550~650	15~23	40~53	70~100
100	450~480	400~500	19~34	44~55	90~110
200	400~450	320~380	25~28	49~60	120~130
300	330~380	250~320	21~26	55~73	130~150
400	320~360	240~290	18~25	66~73	140~170
500	290~330	230~270	16~19	59~68	160~200
600	270~300	220~240	22~36	62~78	180~260
700	150~190	130~170	50~69	87~97	180~240
800	70~90	60~80	72~90	94~98	240~250
900	20~30	10~20	80~90	—	200~240

② 热变形工艺规范见表7.2-114所示。

表7.2-114 TA16钛合金热变形工艺规范

锻造类型		加热温度/℃	终锻温度/℃	每火变形量/%
铸锭开坯		1 050~1 100	850	40~50
坯料锻造	≤100 mm	1 030~950	800	50~60
	>100 mm	960~925	800	50~70
压力机模锻		950~900	750	50~70
锻锤模锻		960~925	800	50~70
板材轧制		1 050~950	800	50~70
管材挤压		900~960	—	—

3）冲压成形工艺和性能

① 板材冲压成形性能见表7.2-115。

表7.2-115 TA16钛合金板材冲压成形性能

δ/mm		<1.0	1.0~3.0	1.6~3.0	>3.0
最小弯曲半径	冷态	(1.8~2.2)δ	(2.0~2.5)δ	—	(2.5~3.5)δ
	热态	(1.3~1.5)δ	(1.4~1.8)δ	—	(1.4~2.0)δ
极限拉深系数	冷态	—	1.8~2.0	—	—
	热态	—	>2.0	—	>2.0
极限翻边系数	冷态	1.35~1.50 (δ=0.3~0.7)	1.6~1.7 (δ=0.8~1.5)	1.45~1.55	1.4

② 板材冲压成形温度制度 与工业纯钛或TC1相似，或者在500~600℃下进行。

4）焊接工艺和性能

① 手工氩弧焊对接接头的力学性能见表7.2-116。

表7.2-116 TA16钛合金手工氩弧焊对接接头的力学性能

焊接材料	δ/mm	焊前状态	焊后处理	焊丝牌号	θ/℃	σ_b/MPa	η/%	α/(°)
板材	1.0	退火	—	TA16	RT	555~565	1~1.01	130
	1.0	退火	—	TA16	RT	585~595	1.06~1.07	95~130
管材	φ12×1	退火	—	—	RT	564	1.03	—

② 钨极氩弧焊对接接头的力学性能见表7.2-117。

表7.2-117 TA16钛合金钨极氩弧焊对接接头的力学性能（1.0~1.2 mm板材）

θ/℃	σ_b/MPa	η/%
RT	540	0.95
150	430	—
250	350	—
350	315	—
400	295	—

5.6 选材及应用

TA16合金具有优良的工艺性能、焊接性能和耐蚀性能，是宇航、原子能、舰船及其他工业部门重要的结构材料，可用于制作各种飞行器导管及原子能、化工等换热器结构件。

6 TA10钛合金

TA10（Ti-0.3Mo-0.8Ni）合金是为了改善纯钛的缝隙腐蚀性能而研制的一种低合金化Ti-Mo-Ni系近α合金，该合金中含有0.3%Mo（质量分数）和0.8%Ni（质量分数），不仅强化了合金，而且对高温、低pH值氯化物或弱还原性酸具有良好的抗缝隙腐蚀性能，其耐蚀性显著优于纯钛而接近TA9合金。TA10合金具有良好的工艺塑性和焊接性能，在化工行业已经得到了广泛的应用。该合金可在退火状态下使用，其主要产品有板材、棒材、管材、锻件和丝材等。

1）材料牌号 TA10。

2）相近牌号 Gr.12（美国）。

6.1 化学成分

GB/T 3620.1—1994《钛及钛合金牌号和化学成分》所规定的化学成分见表7.2-118所示。

表7.2-118 TA10钛合金化学成分（质量分数） %

合金元素			杂质≤						
Ti	Mo	Ni	Fe	C	N	H	O	其他元素 单个	其他元素 总和
余量	0.2~0.4	0.6~0.9	0.30	0.08	0.03	0.015	0.25	0.10	0.40

6.2 物理及化学性能

1）密度 ρ=4.54 g/cm^3。

2）熔化温度约1 660℃。

3）热导率见表7.2-119。

表 7.2-119　TA10 钛合金热导率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
λ/W·m^{-1}·K^{-1}	19	19.5	18	17	16.5	15.3	—

4）比热容见表 7.2-120。

表 7.2-120　TA10 钛合金比热容

θ/℃	100	200	300	400	500	600
c/J·kg^{-1}·K^{-1}	19.5	18	17	16.5	15.3	—

5）线胀系数见表 7.2-121。

表 7.2-121　TA10 钛合金线胀系数

θ/℃	100	200	300	400	500
α/10^{-6}K^{-1}	8.31	8.87	9.02	9.03	9.06

6）电阻率见表 7.2-122。

表 7.2-122　TA10 钛合金电阻率

θ/℃	20	100	200	300	400	500
ρ/μΩ·m	0.52	0.65	0.82	0.99	1.15	1.28

7）磁性能　无磁性。

8）抗氧化性能　与纯钛接近。

9）耐蚀性能

① 镍、钼对耐蚀性的影响　镍提高了钛在盐酸溶液中的抗缝隙腐蚀能力，但在还原性酸中，Ti-Ni 合金的耐蚀性反而低于纯钛。为了改善 Ti-Ni 合金在还原介质中的耐蚀性，试验发现 Ti-Ni 合金中适当加入钼可提高其耐蚀性能。表 7.2-123 指出了不同镍、钼含量的 Ti-Mo-Ni 合金在不同浓度盐酸和硫酸中的耐蚀性，其中尤其是低铁的 Ti-Mo-Ni 合金的耐蚀性能最好。

表 7.2-123　钼、镍含量对 Ti-Mo-Ni 钛合金在沸腾酸耐蚀性的影响

合金元素（质量分数）/%		腐蚀率/mm·a^{-1}			
Ni	Mo	沸腾 5% HCl（体积分数）		沸腾 1% H_2SO_4（体积分数）	
		0.02%Fe	0.2%Fe	0.02%Fe	0.2%Fe
0	0	6.25	6.27	17.96	16.46
0	0.3	5.79	5.38	14.33	14.05
0	0.6	5.77	5.41	14.02	14.22
0.8	0	3.17	17.12	21.59	28.09
0.8	0.3	0.41	2.49	27.69	0.53
0.8	0.6	1.30	1.55	44.70	4.90

② TA10 合金在氯化物中的耐蚀性能　TA10 合金在氯化物中的耐蚀性能见表 7.2-124、表 7.2-125 及图 7.2-10 所示。TA10 合金对高温、低 pH 值氯化物或弱还原性酸具有良好的抗缝隙腐蚀性能，其耐蚀性显著优于纯钛和 Ti－Pd 合金。该合金在中性盐水中可使用到260℃。即使 pH 值为 2 的酸性盐水中使用到 170℃也不会产生缝隙腐蚀。TA10 合金对氯化物、湿氯气、次氯酸盐和海水有优异的耐蚀性能。

表 7.2-124　TA10 与其他钛合金在含氯介质中的耐蚀性能比较

介质	温度/℃	腐蚀率/mm·a^{-1}		
		Ti	TA10	Ti-Pd
湿氯气	87.78	0.0016①	0.000 88①	
2% NaCl + 5% NaClO + 4% NaCl	沸腾	0.7112	0.060 9②	0.060 9②
70% $ZnCl_2$	87.78～93.33		0.005～0.007 6	

① 焊接试样；

② 无缝隙腐蚀。

表 7.2-125　TA10 在沸腾盐溶液中 500 h 缝隙腐蚀试验结果

介质	pH	Ti	TA10	Ti-Pd
$ZnCl_2$（饱和）	3.0	有缝隙腐蚀	无缝隙腐蚀	无缝隙腐蚀
10% $AlCl_3$	—	有缝隙腐蚀	无缝隙腐蚀	无缝隙腐蚀
10% $MgCl_2$	4.2	有缝隙腐蚀	无缝隙腐蚀	无缝隙腐蚀
10% NH_4Cl	4.1	有缝隙腐蚀	无缝隙腐蚀	无缝隙腐蚀
NaCl（饱和）	1.0	有缝隙腐蚀	无缝隙腐蚀	无缝隙腐蚀
NaCl（饱和）+ Cl_2	1.0	有缝隙腐蚀	无缝隙腐蚀	无缝隙腐蚀
10% Na_2CO_3	1.0	有缝隙腐蚀	无缝隙腐蚀	无缝隙腐蚀
10% $FeCl_3$	0.6	有缝隙腐蚀	有缝隙腐蚀	无缝隙腐蚀

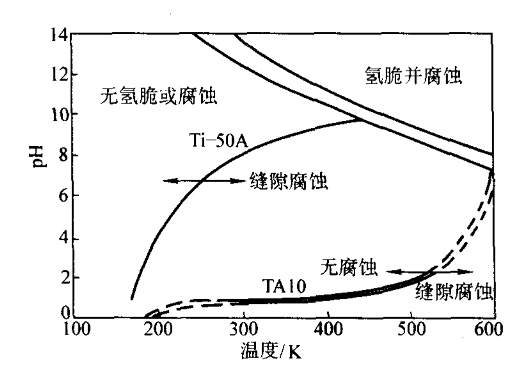


图 7.2-10　温度及 pH 值对 TA10 在饱和氯化钠溶液中抗缝隙腐蚀的影响

③ TA10 合金在还原性无机酸中的耐蚀性　TA10 合金在还原性无机酸中的耐蚀性见表 7.2-126 和图 7.2-11 所示。在硫酸和盐酸中，TA10 合金的耐蚀性优于纯钛和 Ti-Pd 合金。

表 7.2-126　TA10 在盐酸和硫酸中的腐蚀性能

试验溶液	试验时间/h	试验温度/℃	腐蚀率/mm·a^{-1}
7.5% HCl	648	20	0.000
10% HCl	648	20	0.022
12.5% HCl	496	20	0.401
5% HCl	480	50	0.012
10% HCl	384	50	1.97
1% HCl	22	沸腾	0.026
7.5% H_2SO_4	648	20	0.006
10% H_2SO_4	648	20	0.032
15% H_2SO_4	496	20	0.469
4% H_2SO_4	480	50	0.078
5% H_2SO_4	384	50	0.17
1% H_2SO_4	24	沸腾	0.038

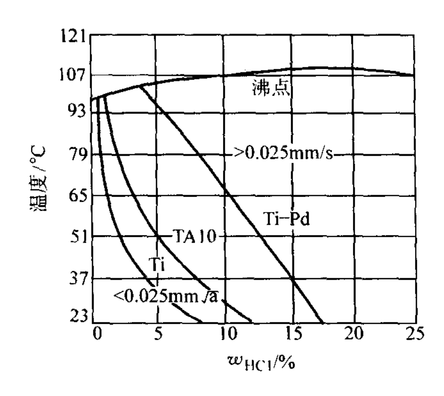


图 7.2-11　TA10 与纯钛、TA9 合金在盐酸中的耐蚀性比较

④ TA10 合金在有机酸中的耐蚀性　TA10 合金在有机酸中的耐蚀性见表 7.2-127。从表可见，TA10 合金的耐蚀性优于纯钛，并接近 Ti-Pd 合金。

表 7.2-127　TA10 在沸腾有机酸中的耐蚀性

介质	腐蚀率/$mm\cdot a^{-1}$		
	Ti	TA10	Ti-Pd
50% 柠檬酸	0.355 6	0.012 7	0.015 4
10% 氨基磺酸	13.665 2	11.557 0	0.370 8
45% 甲酸	10.998 2	无	无
80%～90% 甲酸	2.108 2～3.657 6	0～0.558 8	0～0.055 9
90% 甲酸（阳极化）	2.286 0	0.055 88	无
10% 草酸	94.980 0	104.040 0	32.258 0

⑤ TA10 合金在硝酸中的耐蚀性　TA10 合金在硝酸中的耐蚀性优于 Ti 及 Ti-Pd 合金。例如，在 40%～50% 沸腾硝酸中 TA10 的腐蚀率约为纯钛或 Ti-Pd 合金的一半。图 7.2-12 为 TA10 合金在硝酸中的耐蚀性。另外 TA10 在硝酸蒸气中的耐蚀性也优于纯钛。

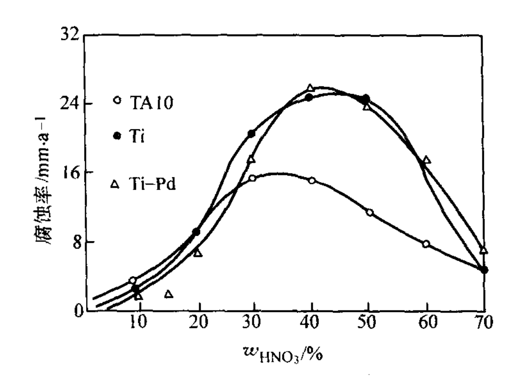


图 7.2-12　TA10 合金与纯钛、TA9（Ti-Pd）合金在硝酸中的耐蚀性的比较

⑥ TA10 合金在碱溶液中的耐蚀性　TA10 合金材料长期暴露在苛性碱和其他高浓度碱性溶液中可能发生腐蚀和氢脆。因此，在碱性溶液中的使用温度与纯钛一样控制在 93℃。

⑦ TA10 合金在化工生产中的耐蚀性见表 7.2-128。

6.3　相变及显微组织

1）相变温度　$\alpha+\beta \leftrightarrow \beta$ 相的转变温度为 890±15℃。

2）显微组织　室温组织以 α 相为主，在晶界处有多个球状的 β 组织。TA10 合金的晶粒比较稳定，这是因为金属间化合物 Ti_2（Ni、Mo、Fe）的析出显著抑制了晶粒的长大。

6.4　力学性能

1）技术标准规定的性能见表 7.2-129。

表 7.2-128　TA10 合金在化工生产现场试验和应用情况

项目	工作环境	试验或使用结果
真空制盐一效加蒸室	135℃，0.44 MPa NaCl：220 g/L $S_2O_3^{2-}$，SO_4^{2-}，NH_4^+，Ca^{2+}，Mg^{2+}，Cl^-，Br^-，I^-，Sr^{2+}，Li^+，K^+，HS 少量	1）腐蚀率为 0.000 1 mm/a 2）6 个月未见缝隙腐蚀
模拟试验	介质同上	运转 18 月未见异常
黑卤制盐材质试验	100℃黑卤液，除 NaCl 外还有 Ca^{2+}，Mg^{2+}，SO_4^{2-}，K^+，Sr^{2+}，Li^+，Br^-，I^-，Cl^-，NH_4^+，O_2，H_2S	1 000 h 试验结果：合金无点蚀和缝隙腐蚀
烧碱生产挂片	95℃食盐电解液，NaCl 230～270 g/L，以及 NaOCl，$NaOCl_3$，游离 Cl，pH＝2～4	3 个月未见腐蚀
应用试验	95℃食盐电解液，具体同上	工业运行 2 年未见明显缝隙腐蚀
离子膜法制碱	95℃食盐电解液，具体成分与隔膜法制碱相同	在中试装置中采用 500 g Ti-Mo-Ni 合金
乙烯氧化制乙醛	100℃ $PdCl_2$ 1～2 g/L，$CuCl_2 2H_2O$ 200 g/L HCl 1%	1）腐蚀率为 0.011 mm/a 2）完全腐蚀
甲酸生产	145～147℃ 85%甲酸 压力 0.294 MPa	60 h 气相、液相失重为 0.000 mg，为完全耐蚀材料

表 7.2-129　TA10 钛合金技术标准规定的性能

技术标准	品种	状态	δ 或 d/mm	取样方向	室温性能，≥				
					σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	φ/%	α/(°)
GB/T 3621—1994	板材	退火	2.0～5.0 5.1～10.0	LT	485	345	20 15	— —	130 —
GB/T 3621—1999	带箔材	退火	0.3～<0.5 0.5～2.0	LT (L)	485	—	15 18②	— —	90

续表 7.2-129

技术标准	品种	状态	δ 或 d/mm	取样方向	室温性能，≥				
					σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	φ/%	α/(°)
GB/T 3623—1996	丝材①	退火	0.1～0.7	L	—	—	—	—	—
GB/T 3624—1995	管材	退火	—	L	440	—	18②	—	—
GB/T 3625—1995	管材	退火	—	L	440	—	18②	—	—
GB/T 2965—1996	棒材	退火	—	L	485	345	18	25	—
GB/T 2218—1994	饼环材	退火	≤100 cm²	弦向	485	345	18	25	—

① 焊丝不检验力学性能；② 为 δ_{50} 的数据。

2) 室温及各种温度下的力学性能

① 硬度 HB = 180～235。

② 合金的拉伸性能见表 7.2-130。

表 7.2-130 TA10 钛合金的室温力学性能

性能	数值	产品种类
σ_b/MPa	480	所有品种
$\sigma_{p0.2}$/MPa	345	所有品种
δ_{50}/%	18	所有品种
ψ/%	25	棒、坯、锻件
弯曲半径（R/T）	2.0	T < 1.8 mm 板材
	2.5	T = 1.8～4.7 mm 板材
压扁性能	9×名义壁厚	管材
扩口性能（内径扩大）	17	管材

③ TA10 合金不同产品的室温性能见表 7.2-131。

表 7.2-131 TA10 合金不同产品的室温性能

产品	规格/mm	状态	室温性能				
			σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	φ/%	α/(°)
棒材	φ220	M	490 470	400 375	17 18	30 31	—
	φ28	M	515 520	320 335	33 32	54 52	—
板材	δ8.0	M	645 640	530 525	32 35	—	—
	δ2.0	M	535 530	445 445	39 39	—	> 130 > 130
管材	φ45×4	M	540 540	350 345	30 30	—	—
	φ38×1.2	M	570 565	—	—	—	—

各种温度下的拉伸性能见表 7.2-132。

表 7.2-132 TA10 钛合金 2.0 mm 板材在各种温度下的拉伸性能（退火状态，横向）

T/℃	σ_b/MPa	δ_5/%
20	515	31
100	412	40
200	304	43
300	265	37

续表 7.2-132

T/℃	σ_b/MPa	δ_5/%
400	210	43
500	162	77
600	70	130
700	40	156

④ 高温蠕变与持久性能见表 7.2-133、表 7.2-134。

表 7.2-133 TA10 钛合金蠕变性能

温度/℃	应力/MPa	蠕变/%
25	138	0
	207	9.2×10^{-8}
	290	3.6×10^{-5}
	331	3.94×10^{-5}
150	108	0
	179	7.2×10^{-6}
	221	4.8×10^{-6}
315	48	3.3×10^{-6}
	83	8.2×10^{-6}
	103	1.4×10^{-5}
	124	1.5×10^{-5}
	138	1.86×10^{-5}

表 7.2-134 TA10 钛合金高温蠕变与持久性能

合金	1 000 h，250℃，1.0%蠕变/MPa	1 000 h，250℃，断裂/MPa
TA10	221	297

⑤ TA10 合金的弹性性能见表 7.2-135。

表 7.2-135 TA10 合金的弹性性能

E/GPa	E_D/GPa	G/GPa	μ
103～107	118	43	0.34～0.40

不同温度的静态弹性模量见表 7.2-136。

表 7.2-136 TA10 钛合金静态弹性模量

θ/℃	20	100	200	300	400	500
E/GPa	110	103	95	87	80	74

6.5 制造工艺和性能

1）热处理工艺和性能　由于 TA10 合金的组织以 α 相为主，因此，合金材料的最终热处理包括了消除应力退火和再结晶退火，推荐制度见表 7.2-137。

表 7.2-137　TA10 合金推荐的热处理制度

热处理	温度/℃	时间/h	冷却方法
消除应力	480～595	15 min～4 h	AC 或分级冷却
退火	650～760	6 min～2 h	AC

2）热变形工艺和性能　TA10 合金为低合金化的近 α 合金，其工艺性能、焊接性能和机加工性能等均与工业纯钛相似，其热变形工艺规范如表 7.2-138。

表 7.2-138　TA10 合金的热变形工艺规范

锻造类型	加热温度/℃	终锻温度/℃	每火变形量/%
铸锭开坯	1 050～1 100	850	40～50
坯料锻造　≤100 mm	950～900	800	50～60
＞100 mm	950～900	800	50～70
压力机模锻	950～900	750	50～70
锻锤模锻	980～900	800	50～70

6.6 选材及应用

TA10 合金大量使用在纯钛可能发生缝隙腐蚀的工况条件下。典型设备包括生产氯化锌的换热器，生产溴的脱膜机、处理稀盐酸蒸气的换热器以及真空制盐装置。由于该合金的强度较高，因此在需要改善纯钛高温强度的设备上以及在高温、低 pH 值的氯化物或弱还原性溶液中的应用不断增加。为了节约贵金属 Pd，该合金可部分替代 TA9（Ti-Pd）合金。

7 TA11 钛合金

TA11 合金是一种近 α 型钛合金，其名义成分为 Ti-8Al-1Mo-1V，含有 α 稳定元素 Al 和同晶型 β 稳定元素 Mo 和 V。该合金具有较高的弹性模量和较低的密度，所以其比刚度是工业钛合金中最高的。该合金的室温抗拉强度与 TC4 合金相当，但高温强度和抗蠕变性能优于 TC4 合金。TA11 合金对热盐应力腐蚀的敏感性比 TC4 合金更高。该合金可以进行各种方式的焊接，焊接性能优良，虽然韧性有些下降，但焊接强度与基体金属相近。该合金主要用于制造航空发动机高压压气机盘、叶片和机匣等，最高长期工作温度为 450℃。生产的半成品主要有板材、带材、棒材、锻件、焊丝等。

1）材料牌号　TA11。

2）相近牌号　Ti-8Al-1Mo-1V（美国）。

7.1 化学成分

XJ/BS 5163—1997《YZTi-811 合金棒材》规定的化学成分见表 7.2-139。

7.2 物理及化学性能

1）密度 $\rho = 4.37\ g/cm^3$。

2）熔化温度范围约 1 704℃。

3）热导率见表 7.2-140。

表 7.2-139　TA11 钛合金的化学成分
（质量分数）　%

合金元素				杂质≤							
Al	Mo	V	Ti	Fe	C	N	H	O	Y	其他元素① 单个	其他元素① 总和
7.35～8.35	0.75～1.25	0.75～1.25	余量	0.30	0.08	0.05	0.015	0.12	0.005	0.10	0.40

① 产品出厂时供方可不检验其他元素和 Y，用户要求并在合同中注明时可予以检验。

表 7.2-140　TA11 钛合金的热导率

θ/℃	20	100	200	300	400	450	500	600	650
$\lambda/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	6.7	7.6	8.7	10.0	11.4	12.1	12.9	14.5	15.4

4）比热容见表 7.2-141。

表 7.2-141　TA11 钛合金的比热容

θ/℃	20	100	200	300	400	450	500	600	650
$c/J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	554	573	597	624	653	668	683	717	734

5）线胀系数见表 7.2-142。

表 7.2-142　TA11 钛合金的线胀系数

θ/℃	20～100	20～200	20～300	20～400	20～500	20～600	20～700	20～800
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	8.5	8.9	9.3	9.6	9.7	9.8	9.7	9.6

6）电性能　室温电阻率 $\rho = 1.97\ \mu\Omega \cdot m$。

7）磁性能　无磁性。

8）抗氧化性能　与 TC4 合金相近。

9）耐腐蚀性能　TA11 合金在大气条件下和海水中稳定，但对氯化物应力腐蚀是敏感的，不论高温（热盐应力腐蚀）还是环境温度（含水应力腐蚀）的氯化物都敏感。试样在不同浓度的盐涂覆下，经应力热暴露后的室温拉伸性能见表 7.2-143。

表 7.2-143　TA11 钛合金经热盐应力暴露后的室温拉伸性能

品种	状态	热暴露条件 盐浓度 $/mg \cdot cm^{-2}$	热暴露条件 θ/℃	热暴露条件 σ/MPa	热暴露条件 t/h	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
棒材	双重退火	0.1	425	167	100	953	922	16	37
		0.2				950	914	17	39
		0.4				946	912	16	39
		1.0				958	928	16	41
		6.2				951	916	16	39
		0.2	425	180	10	959	930	16	36
					50	954	925	15	37
					100	965	931	17	37
					150	958	926	15	36
					200	933	911	5.3	5.9
		0.2	370	100	100	950	919	17	37
				150		959	928	17	39
				200		962	931	16	39
				250		956	925	16	37
				300		954	923	16	30
				410		957	923	12	18

7.3　相变及显微组织

1）相变温度　α+β↔β相的转变温度为1 040℃。

2）显微组织　合金在β转变温度至马氏体转变开始点（Ms）以下的α+β相区间内快速冷却时，合金除了初生的α外，β相转变为马氏体和少量介稳定的β相，而在更低温度下（如900℃）快速冷却，富Mo和V的β相被保留下来。当在450℃温度下加热时β相分解。合金的组织主要为α相与少量的β相。

7.4　力学性能

1）技术标准规定的性能见表7.2-144。

2）硬度见表7.2-145。

表7.2-144　技术标准规定的TA11钛合金性能

技术标准	品种	d /mm	状态	室温				425℃					热稳定性①				室温缺口应力断裂			
				σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%	$\sigma_{0.2/100}$ /MPa	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%	d≤ 37.5 mm		d> 37.5 mm	
				≥													σ/MPa	t/h	σ/MPa	t/h
XL/BS 5163—1997	棒材	≤60	双重退火	895	825	10	20	620	485	10	25	410	895	825	9	18	1 035	≥5	895	≥5

① 热稳定试验方法是，最终加工成拉伸试样后，进行425℃，100 h热暴露，然后进行室温拉伸。

表7.2-145　TA11钛合金的硬度

品种	状态	θ/℃	d/mm	HRC	HBS
棒材	双重退火	20	64	35	—
			25～40	—	275～313

3）拉伸性能见表7.2-146。

表7.2-146　TA11钛合金的拉伸性能

品种	d /mm	状态	取样方向	θ /℃	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
棒材	12	910℃，1 h，空冷 +580℃，8 h，空冷	L	20	928	890	21.5	46.0
				100	832	777	22.5	47.0
				200	798	707	22.3	51.3
				300	727	603	25.0	52.0
				400	665	532	24.7	56.0
				450	662	522	24.7	58.3

4）冲击性能见表7.2-147。

表7.2-147　TA11钛合金的冲击性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	a_{KU}/kJ·m^{-2}
棒材	16	910℃，1 h，空冷+580℃，8 h，空冷	L	20	625
				100	929
				200	1 283
				300	1 362
				400	1 417
				450	1 517

5）扭转性能见表7.2-148。

表7.2-148　TA11钛合金的扭转性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	τ_b/MPa	$\tau_{p0.3}$/MPa
棒材	16	910℃，1 h，空冷+580℃，8 h，空冷	L	20	810	582
				100	772	521
				200	719	445
				300	669	387
				400	626	370
				450	615	354

6）承载性能见表7.2-149。

表7.2-149　TA11钛合金的承载性能

品种	δ/mm	状态	θ/℃	e/D	σ_{bru}/MPa	σ_{bry}/MPa
					S	S
板材	0.4～4.8	双重退火	20	1.5	1 538	1 200
				2.0	1 855	1 317

7）热稳定性见表7.2-150。

表7.2-150　TA11钛合金的热稳定性

品种	d /mm	状态	取样方向	热暴露条件			σ_b	$\sigma_{p0.2}$	δ_5	ψ
				θ/℃	σ/MPa	t/h	MPa		%	
棒材	22	退火	L	未暴露			979	937	16.3	37.7
				425	0	100	948	907	19	31
						200	944	913	19	40
						300	957	923	19	38
						400	953	925	19	38
						500	960	928	18	37
				425	410	100	941	875	19	39
						200	972	922	17	40
						300	947	886	18	33
						400	967	893	17	39
						500	952	868	18	33
				425	98	100	982	928	17	38
					196		956	913	16	34
					294		1 007	950	20	34
					410		979	935	18	39
					490		1 005	932	19	37
				325	410	100	1 000	915	18	35
				375			1 002	953	17	42
				425			979	935	18	39
				475			1 015	929	19	40
				525			979	952	2.5	9.2

8）蠕变性能见表7.2-151。

表7.2-151　TA11钛合金的高温蠕变性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	$\sigma_{0.2/100}$/MPa
棒材	≤42	双重退火	L	425	410

9）弹性性能

① 弹性模量　见表7.2-152。室温压缩弹性模量 E_C = 124 GPa。

表7.2-152　TA11钛合金的拉伸和动态弹性模量

品种	棒材						
d/mm	12						
状态	双重退火						
取样方向	L						
θ/℃	20	100	200	300	400	425	450
E/GPa	113	109	106	101	97	—	93
E_D/GPa	117.8	114.0	109.0	102.9	97.1	95.5	94.0

② 切变模量见表7.2-153。

表7.2-153　TA11钛合金的切变模量

品种	棒材						
d/mm	12						
状态	双重退火						
取样方向	L						
θ/℃	20	100	200	300	400	425	450
G/GPa	45.3	44.0	41.9	39.7	37.5	36.9	36.3

③ 泊松比见表7.2-154。

表7.2-154　TA11钛合金的泊松比

品种	棒材						
d/mm	12						
状态	双重退火						
取样方向	L						
θ/℃	20	100	200	300	400	425	450
μ	0.30	0.30	0.30	0.30	0.29	0.29	0.30

7.5　制造工艺和性能

1）热处理制度

① 双重退火，900～1 000℃，1～2 h，空冷或更快冷 +595℃，8 h，空冷。

② 去应力退火，595～760℃，0.25～4 h，空冷或炉冷。

2）熔炼工艺　合金应经过两次以上真空自耗电弧炉熔炼。用于制造航空发动机转子零件的合金应经过三次真空自耗熔炼。

3）热变形工艺　铸锭开坯通常在β转变温度以上100～200℃，变形终止温度不低于900℃。成品棒材的锻造温度为β转变温度以下30～50℃，变形终止温度不低于800℃。

4）板材热成形性　TA11合金的热成形性是与其他富α相合金相类似的，其β转变温度高于TC4合金，因而就允许该合金在较高的温度范围内进行热加工。当终锻温度在β转变温度以上时，产生比β转变温度以下加工时粗大的晶粒。板材的成形比TC4合金困难。对于加工量大的成形来说，必须保持温度在715～745℃温度区间。

5）焊接工艺　TA11合金可进行点焊、缝焊、钨极氩弧焊和电子束焊。熔焊的接头强度与基体相当，但韧性有些下降。为了避免损失断裂韧度以及降低焊接金属与基体金属对应力腐蚀的敏感性，去应力退火不得在540～690℃范围内进行。在薄板的熔焊方面发现260℃预热可减少焊件的残余应力。

6）切削加工与磨削性能　与其他钛合金一样，TA11合金的切削加工性能与不锈钢相似。一般来说，大倾角、边部锋利的刀具有利于加工。最好采用较慢的速度和较大的刀具，可以使刀具温度低、产生粗的切屑。TA11合金退火状态的车加工参数见表7.2-155。

7.6　选材及应用

TA11合金已用于制造航空发动机高压压气机转子叶片。由于该合金对氯化物应力腐蚀的敏感性，因此在含有氯化物的环境下使用应格外小心。推荐选用TA11钛合金制造航空发动机高压压气机转子叶片等结构件。

表7.2-155　TA11钛合金退火状态的车加工参数

加工方式	刀具材料	刀具形状①	切削深度/mm	进刀量/mm	切削速度/m·min⁻¹
粗车	铜焊硬质合金（C_2）	A、E、F	2.5～6.35	0.25～0.38	21～42
	多刃硬质合金（C_2）	A、E、F	2.5～6.35	0.25～0.38	46～60
	高速钢（M、T5、T15）	B、D、E、F	2.5～6.35	0.25～0.38	73～220②
精车	铜焊硬质合金（C_3、C_2）	A、C	0.635～2.5	0.13～0.25	27～47
	多刃硬质合金（C_3、C_2）	A、C	0.635～2.5	0.13～0.25	50～56
	高速钢（M、T5、T15）	C、E、F	0.635～2.5	0.13～0.25	73～183②

① 参看有关刀具的代码表。

② 当采用该刀具切削时，如果要求更大的进刀量，此高速应有所降低。

8　TA12钛合金

TA12钛合金名义成分为Ti-5.5Al-4Sn-2Zr-1Mo-0.25Si-1Nd，是一种用稀土金属Nd强化的综合性能良好的近α型热强钛合金。该合金长时间工作温度可达550℃，用于航空发动机高压段的压气机盘、鼓筒和叶片等零件。

该合金具有良好的工艺塑性，适合于各种压力加工成形，并可采用各种方式的机械加工。生产的半成品主要有棒材和锻件、板材等，也可用于生产铸件。

1）材料牌号　TA12。

2）相近牌号　IMI829（英国）。

8.1　化学成分

XL/BS 5161—1995《航空发动机转子叶片用TA12高温钛合金棒材技术标准》、XL/BS 5160—1995《航空发动机压气机盘用TA12高温钛合金饼、环坯技术标准》、Q/6S 1192—1995

《TA12 高温钛合金高压转子叶片精锻件技术标准》和 Q/6S 1190—1995《TA12 高温钛合金压气机盘及鼓筒模锻件技术标准》规定的化学成分见表 7.2-156。

8.2 物理及化学性能

1）密度 $\rho=4.56\ g/cm^3$。

2）热导率见表 7.2-157。

3）比热容见表 7.2-158。

4）线胀系数见表 7.2-159。

5）磁性能　无磁性。

6）化学性能

① 抗氧化性能　由于合金中添加了稀土元素钕，与合金中的氧和锡等元素形成了富钕稀土相，阻碍位错的运动，细化晶粒，促进了 ZrO_2 及 SiO_2 的选择性氧化析出和“钉扎”等作用，改善了氧化层与基体的结合能力，提高了合金抗高温和循环氧化性能。

表 7.2-156　TA12 钛合金化学成分（质量分数）　%

合金元素							杂质≤						
Al	Mo	Sn	Zr	Si	Nd	Ti	Fe	C	N	H	O	其他元素	
												单个	总和
4.8~6.0	0.75~1.25	3.7~4.7	1.5~2.5	0.20~0.35	0.6~1.2	余量	0.25	0.10	0.05	0.012	0.15	0.10	0.30

注：产品出厂时可不检验其他元素，用户要求并在合同中注明时可予以检验。

表 7.2-157　TA12 钛合金热导率

θ/℃	25	100	200	300	400	500	600
$\lambda/W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	4.8	5.7	7.3	9.1	10.7	12.1	13.3

表 7.2-158　TA12 钛合金比热容

θ/℃	25	100	200	300	400	500	600
$c/J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$	465	495	525	555	587	610	632

表 7.2-159　TA12 钛合金线胀系数

θ/℃	20~100	20~200	20~300	20~400	20~500	20~600
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	7.6	8.1	8.6	8.9	9.3	9.7

② 耐腐蚀性能　该合金具有良好的耐腐蚀性。

8.3 相变及显微组织

1）相变温度　$\alpha+\beta\leftrightarrow\beta$ 转变温度为 1 005℃ ± 10℃。

2）显微组织　合金在室温下的平衡组织主要含 α 相和 β 相，还可能出现少量的富钕稀土相、硅化物和 Ti_3X 相。

8.4 力学性能

1）技术标准规定的性能见表 7.2-160。

2）室温及各种温度下的力学性能

① 硬度　室温硬度见表 7.2-161。

② 拉伸性能　各种温度下的拉伸性能见表 7.2-162。棒材的拉伸应力-应变曲线见图 7.2-13。

表 7.2-160　TA12 钛合金标准规定的性能

技术标准	品种	d/mm	状态①	取样方向	室温					550℃				热稳定性②		
					σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%	HBS (d/mm)	σ_b /MPa	δ_5 /%	ψ /%	σ_{100} /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	ψ /%
					≥					≥				≥		
XL/BS 5161—1995	棒材	20~50	双重退火	L	980	900	10	25	—	610	12	30	430	980	7	15
Q/6S 1192—1995	叶片	—		L	980	900	10	25	—	610	12	30	430	980	7	15
XL/BS 5160—1995	饼、环坯	—		C	930	830	8	16	—	580	10	25	430	930	6	10
Q/6S 1190—1995	盘模锻件	—	三重退火	C	930	830	8	15	3.2~3.7	580	12	25	480③	930	6	10
	鼓筒模锻件	—	三重退火	C	930	830	8	15	3.2~3.7	580	9	20	440	930	6	10

① 棒材和饼坯均在切成试样后进行退火，而盘模锻件则在盘件双重退火后再切取试样。

② 热稳定试验方法是，最终加工成拉伸试样后，进行 550℃，100 h 热暴露，然后进行室温拉伸。

③ 480 MPa 应力持久时间为大于 50 h。当 480 MPa 应力持久时间小于 50 h 时，可再在 440 MPa 应力下测试持久性能，如大于 100 h，仍判为合格。

表 7.2-161　TA12 钛合金硬度值

品种	d/mm	状态	HBS
棒材	20~25	双重退火	316
饼、环坯	—		305

盘模锻件的拉伸应力-应变曲线见图 7.2-14。

③ 冲击性能　室温冲击韧度见表 7.2-163。

④ 扭转与剪切性能　棒材的扭转性能见表 7.2-164。

⑤ 应力集中　见表 7.2-165。

表 7.2-162　TA12 钛合金各种温度下的拉伸性能

品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	θ /℃	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
棒材	22	双重退火	L	20	1 029	965	15.4	37.0
				200	844	708	16.7	39.8
				300	784	630	16.2	41.2
				400	745	595	17.4	41.2
				500	720	578	15.9	44.0
				550	667	548	19.0	48.5
				600	640	519	20.4	52.9

续表 7.2-162

品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	θ /℃	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
叶片	—	双重退火	L	20 550	1 033 685	970 —	16.6 18.5	45.2 52.7
饼坯	470×56	双重退火	C	20 300 550	1 013 777 677	938 637 557	12.0 14.3 16.0	24.7 34.3 38.7
环坯	460/290 ×58	双重退火	C	20 550	1 030 680	960 553	11.7 16.3	21.5 34.7
盘模锻件	470×56	三重退火	C	20	993	906	12.9	24.3
			R		972	884	15.3	31.9
			L		913	813	11.8	28.4

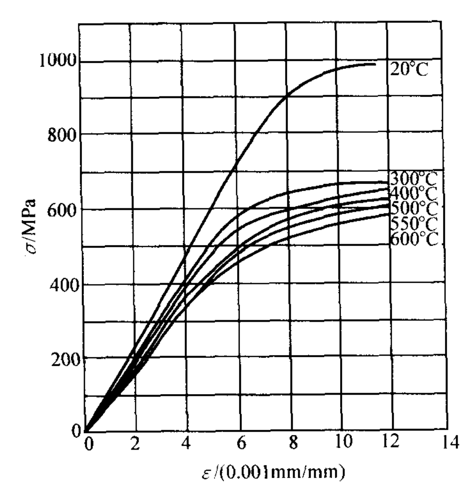


图 7.2-13　TA12 钛合金棒材的拉伸应力-应变曲线

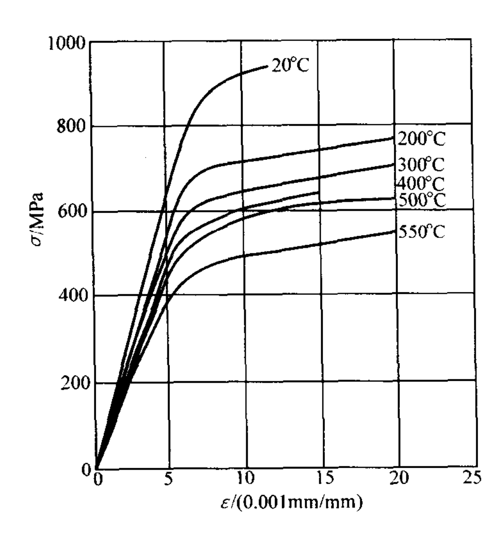


图 7.2-14　TA12 钛合金盘模锻件的拉伸应力-应变曲线

表 7.2-163　TA12 钛合金室温冲击韧度

品种	d 或 δ/mm	状态	取样方向	a_{KU}/kJ·m^{-2}
棒材	22	双重退火	L	345
饼坯	430×51	双重退火	C	229
环坯	460/290×58	双重退火	C	255

表 7.2-164　TA12 钛合金棒材扭转与剪切性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	τ_b /MPa	$\tau_{p0.3}$ /MPa	$\tau_{p0.01}$ /MPa	扭转角 /(°)
棒材	22	双重退火	L	20	887	650	500	293
				300	700	422	324	370
				500	633	352	263	425
				550	594	347	251	393
				600	558	346	223	—

表 7.2-165　TA12 钛合金应力敏感性

品种	d 或 δ/mm	状态	取样方向	K_t	θ/℃	σ_{bH}/MPa	σ_{bH}/σ_b
棒材	22	双重退火	L	3	20	1 597	1.6
					300	1 160	1.5
					500	1 143	1.4
					550	1 016	1.5
					600	999	1.6
饼坯	430×51		C		20	1 537	1.5
					300	1 273	1.6
					550	1 028	1.5
环坯	460/290×58		C		20	1 593	1.6
					550	1 028	1.5

⑥ 热稳定性　棒材加工的试样热暴露后的室温拉伸性能见表 7.2-166。

表 7.2-166　TA12 钛合金材料的试样热稳定性

品种	d /mm	状态	取样方向	热暴露条件			σ_b	$\sigma_{p0.2}$	δ_5	ψ
				θ/℃	σ/MPa	t/h	MPa		%	
棒材	22	双重退火	L	未暴露			1 047	990	14.8	41.5
				500	0	100	1 070	1 023	13.3	35.2
						200	1 076	1 033	14.2	35.1
					245	100	1 085	1 038	12.9	32.9
						200	1 080	1 033	12.5	32.8
				550	0	100	1 079	1 037	12.6	30.9
						200	1 079	1 044	12.4	25.8
					245	100	1 080	1 042	13.1	30.7
						200	1 076	1 042	11.6	24.4

3) 持久和蠕变性能

① 高温持久性能见表 7.2-167。

表 7.2-167　TA12 钛合金高温持久性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_{50} /MPa	σ_{100} /MPa	σ_{200} /MPa	σ_{300} /MPa
棒材	22	双重退火	L	500	678	670	652	640
				550	525	472	430	380
				600	338	227	227	200
叶片	—	双重退火	T	550	—	440	—	—

② 高温蠕变性能见表 7.2-168。

③ 棒材的持久应力-寿命曲线见图 7.2-15。

④ 棒材的蠕变应力-寿命曲线见图 7.2-16 和图 7.2-17。

⑤ 盘模锻件的持久应力-寿命曲线见图 7.2-18。

表 7.2-168　TA12 钛合金高温蠕变性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	$\sigma_{0.1/50}$	$\sigma_{0.1/100}$	$\sigma_{0.1/200}$	$\sigma_{0.1/300}$	$\sigma_{0.2/50}$	$\sigma_{0.2/100}$	$\sigma_{0.2/200}$	$\sigma_{0.2/300}$	$\sigma_{0.5/50}$	$\sigma_{0.5/100}$	$\sigma_{0.5/200}$	$\sigma_{0.5/300}$
					MPa											
棒材	22	双重退火	L	500	398	386	353	318	480	451	420	382	546	537	504	468
				550	260	223	158	131	359	301	223	182	445	415	325	260
				600	73	62	53	—	98	88	78	—	142	130	113	—

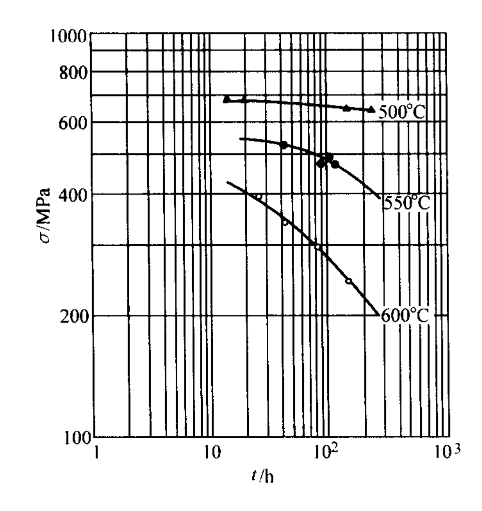


图 7.2-15　TA12 钛合金棒材不同温度的持久应力-寿命曲线

材料品种：棒材　　取样方向：L

材料规格：ϕ22 mm　　热处理状态：980℃，1 h，空冷 +600℃，2 h，空冷

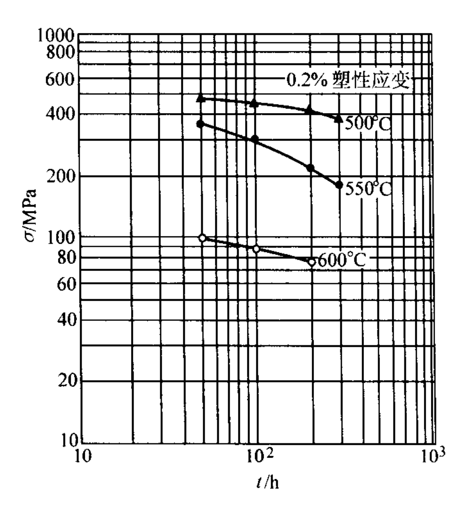


图 7.2-17　TA12 钛合金棒材 0.2%塑性应变的蠕变应力-寿命曲线

材料品种：棒材　　取样方向：L

材料规格：ϕ22 mm　　热处理状态：980℃，1 h，空冷 +600℃，2 h，空冷

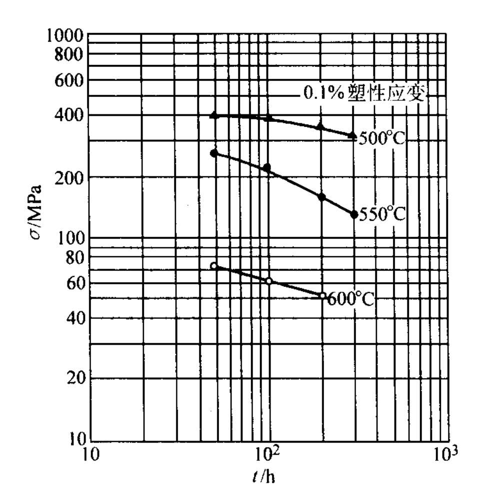


图 7.2-16　TA12 钛合金棒材 0.1%塑性应变的蠕变应力-寿命曲线

材料品种：棒材　　取样方向：L

材料规格：ϕ22 mm　　热处理状态：980℃，1 h，空冷 +600℃，2 h，空冷

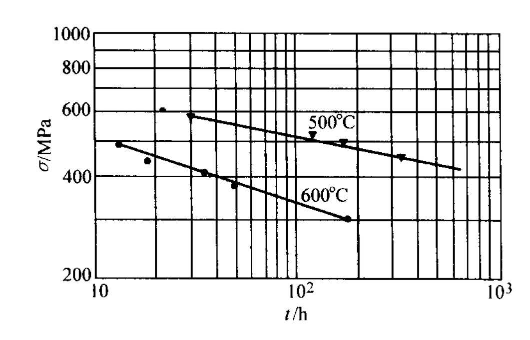


图 7.2-18　TA12 钛合金盘模锻件不同温度的持久应力-寿命曲线

材料品种：盘模锻件

材料规格：ϕ470 mm × 56 mm

取样方向：C

热处理状态：965℃，1.5 h，空冷 +945℃，1.5 h，空冷 +600℃，4 h，空冷

持久方程：

550℃：$\lg\sigma = 2.9290 - 0.1090\lg t$

相关系数：0.978

600℃：$\lg\sigma = 2.8921 - 0.1833\lg t$

相关系数：0.998

4）疲劳性能

① 高周疲劳　旋转弯曲疲劳极限见表 7.2-169。

表 7.2-169　TA12 钛合金旋转弯曲疲劳极限

品种	d 或 δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	N/周	σ_D/MPa
棒材	22	双重退火	L	20	1	−1	10^7	456
					1.7			356
				550	1	−1	10^7	420
					1.7			310
环坯	460/290×58	双重退火	C	20	1	−1	10^7	440
				550	1.7			295

续表 7.2-169

品种	d或δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	N/周	σ_D/MPa
盘模锻件	470×56	三重退火	C	20	1 1.7	-1	10^7	407 294
				550	1 1.7	-1	10^7	363 290

棒材光滑和缺口试样室温旋转弯曲疲劳 S-N 曲线见图 7.2-19。

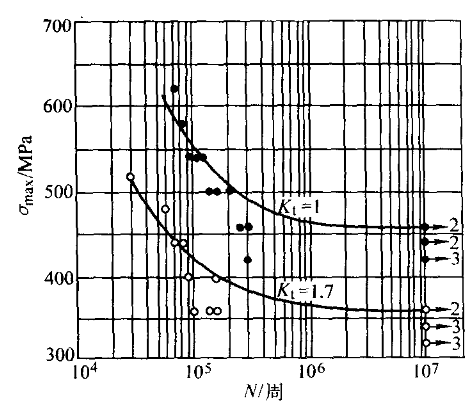


图 7.2-19 TA12 钛合金棒材光滑和缺口试样室温旋转弯曲疲劳 S-N 曲线

材料品种：棒材	试样尺寸：d=4 mm
材料规格：ϕ23 mm	加载方式：旋转弯曲
热处理状态：990℃，1 h，空冷 +600℃，2 h，空冷	应力比：-1 试验频率：83 Hz
材料强度：σ_b=1 013 MPa，$\sigma_{p0.2}$=950 MPa	试验环境：20℃，空气
取样方向：L	试样数：36

棒材光滑和缺口试样 550℃旋转弯曲疲劳 S-N 曲线见图 7.2-20。

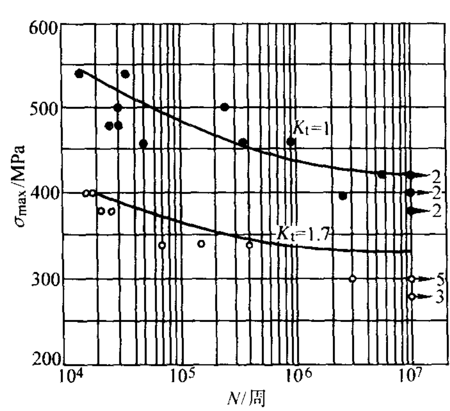


图 7.2-20 TA12 钛合金棒材光滑和缺口试样 550℃旋转弯曲疲劳 S-N 曲线

材料品种：棒材	试样尺寸：d=4 mm
材料规格：ϕ23 mm	加载方式：旋转弯曲
热处理状态：990℃，1 h，空冷 +600℃，2 h，空冷	应力比：-1 试验频率：83 Hz
材料强度： 20℃：σ_b=1 013 MPa，$\sigma_{p0.2}$=950 MPa 550℃：σ_b=658 MPa，$\sigma_{p0.2}$=547 MPa	试验环境：20℃，空气 试样数：34
取样方向：L	

盘模锻件室温轴向加载疲劳极限见表 7.2-170。

② 低周疲劳 盘模锻件室温应力控制低周疲劳性能见表 7.2-171。

表 7.2-170 TA12 钛合金盘模锻件室温轴向加载疲劳极限

品种	d或δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	N/周	σ_D/MPa
盘模锻件	470×56	三重退火	C	20	1	-1	10^7	415

表 7.2-171 TA12 钛合金盘模锻件应力控制低周疲劳

品种	d或δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	f/Hz	σ_{max}/MPa	N/周
盘模锻件	470×56	三重退火	C	20	3	0.1	0.5	300	>56 222
								300	>114 952
								400	24 958
								500	11 169
								600	6 570
								700	2 515

盘模锻件室温应变控制低周疲劳数据及 ε-N 曲线见表 7.2-172 和图 7.2-21。

表 7.2-172 TA12 钛合金盘件室温应变控制低周疲劳性能

材料品种	盘模锻件	试样尺寸	ϕ6.35 mm
材料规格	ϕ470 mm×56 mm	加载波形	三角波
取样方向	C	应变比	-1
试验温度	20℃	试验频率	0.1~1.0 Hz
控制方式	轴向应变	失效判据	断裂
热处理状态	965℃，1.5 h，空冷+945℃，1.5 h，空冷+600℃，4 h，空冷		

稳态迟滞回线特征				$2N_f$/周	试样数量/根
$\Delta\varepsilon_t/2$	$\Delta\varepsilon_e/2$	$\Delta\varepsilon_p/2$	$\Delta\sigma/2$/MPa		
%					
2.970 9	0.927 0	2.043 8	1 131	42	1
2.178 9	0.871 7	1.307 2	1 064	120	1
2.210 3	0.886 9	1.323 4	1 082	160	1
1.719 8	0.890 6	0.829 2	1 087	224	1
1.692 8	0.799 6	0.893 2	976	250	1
1.001 2	0.753 3	0.245 8	922	1 774	1
0.994 7	0.742 2	0.252 5	906	1 208	1
0.794 9	0.681 6	0.113 3	832	3 158	1
0.802 4	0.725 8	0.076 6	886	4 406	1
0.699 9	0.673 0	0.027 0	821	7 372	1
0.704 9	0.687 3	0.017 6	839	8 222	1
0.603 3	0.599 2	0.004 1	731	19 732	1
0.601 5	0.597 1	0.004 4	729	21 748	1
0.498 8	0.497 1	0.001 7	607	57 904	1
0.496 8	0.493 9	0.002 9	603	44 854	1

续表 7.2-172

	σ'_f/MPa	b	ε'_f/%	C	K'/MPa	n'
应变疲劳参数	1 609	-0.081	29.0	-0.662	1 494	0.077
曲线的数学表达式	$\Delta\varepsilon_t/2=0.013\ (2N_f)^{-0.081}+0.290\ (2N_f)^{-0.662}$					
	$\Delta\sigma/2=1\ 494\ (\Delta\varepsilon_p/2)^{0.077}$					

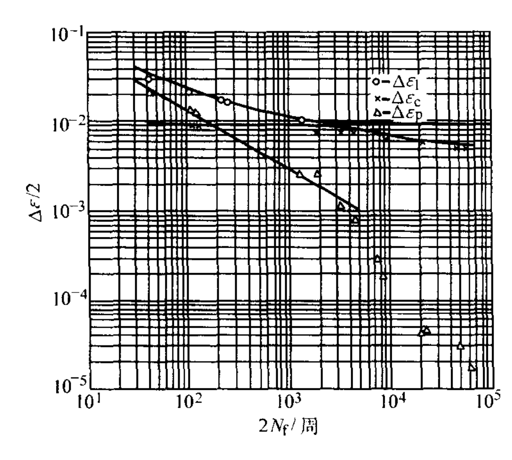


图 7.2-21　TA12 钛合金盘模锻件室温低周疲劳 ε-N 曲线

盘模锻件 550℃应变控制低周疲劳数据及 ε-N 曲线见表 7.2-173 和图 7.2-22。

表 7.2-173　TA12 钛合金盘件 550℃应变控制低周疲劳性能

材料品种	盘模锻件	试样尺寸	φ6.35 mm
材料规格	φ470 mm×56 mm	加载波形	三角波
取样方向	C	应变比	-1
试验温度	550℃	试验频率	0.10~1.0 Hz
控制方式	轴向应变	失效判据	断裂
热处理状态	965℃，1.5 h，空冷+945℃，1.5 h，空冷+600℃，4 h，空冷		

稳态迟滞回线特征				$2N_f$/周	试样数量/根
$\Delta\varepsilon_t/2$ (%)	$\Delta\varepsilon_e/2$ (%)	$\Delta\varepsilon_p/2$ (%)	$\Delta\sigma/2$/MPa		
1.488 5	0.759 9	0.728 6	654	164	1
1.508 0	0.763 4	0.774 6	657	248	1
0.994 5	0.640 7	0.353 8	551	1 294	1
0.796 5	0.566 3	0.230 2	487	2 036	1
0.602 0	0.551 7	0.050 3	475	5 862	1
0.501 0	0.501 0	—	439	9 102	1
0.448 0	0.448 0	—	406	20 266	1
0.398 5	0.398 5	—	364	34 188	1

	σ'_f/MPa	b	ε'_f/%	C	K'/MPa	n'
应变疲劳参数	1 164	-0.108	34.2	-0.697	1 157	—
曲线的数学表达式	$\Delta\varepsilon_t/2=0.014\ (2N_f)^{-0.108}+0.342\ (2N_f)^{-0.697}$					
	$\Delta\sigma/2=1\ 157\ (\Delta\varepsilon_p/2)^{0.125}$					

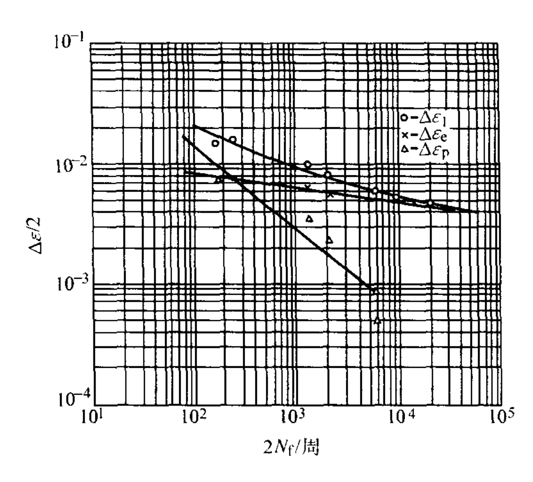


图 7.2-22　TA12 钛合金盘模锻件 550℃低周疲劳 ε-N 曲线

5）弹性性能

① 弹性模量见表 7.2-174。

表 7.2-174　TA12 钛合金弹性模量

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	E/GPa	E_D/GPa
棒材	22	双重退火	L	20	119	123
				100	—	121
				200	—	116
				300	101	110
				400	97	104
				500	—	98
				550	84	—
				600	—	94

② 切变模量见表 7.2-175。

表 7.2-175　TA12 钛合金切变模量

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	G/GPa
棒材	22	双重退火	L	20	45
				300	39
				500	35
				550	33
				600	33

③ 泊松比见表 7.2-176。

表 7.2-176　TA12 钛合金泊松比

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	μ
棒材	22	双重退火	L	20	0.32
				300	0.29
				550	0.27

6）断裂性能

① 断裂韧度见表 7.2-177。

表 7.2-177　TA12 钛合金断裂韧度

品种	d 或 δ/mm	状态	试样类型	取样方向	θ/℃	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$
锻坯	28×45×420	双重退火	CT	L-T	20	77.6
饼坯	430×51	双重退火	CT	L-R		69.0
盘模锻件	470×56	三重退火	CT	C-R		70.8

② 疲劳裂纹扩展速率　环坯室温 da/dN-ΔK 曲线见图 7.2-23。

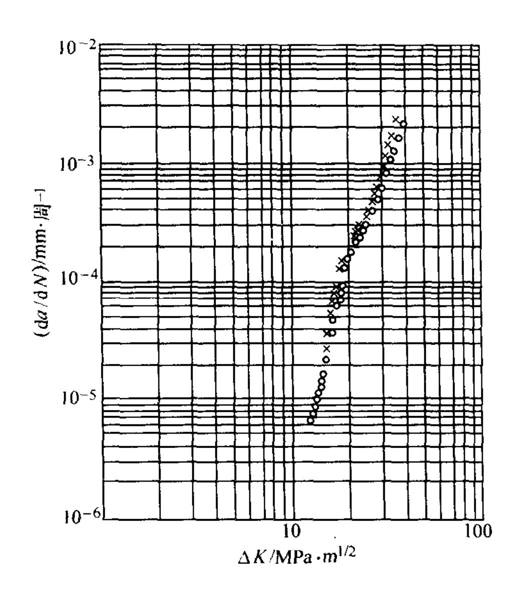


图7.2-23 TA12钛合金环坯室温 da/dN-ΔK 曲线

材料品种：环坯锻件	加载方式：轴向
材料规格：ϕ460 mm/ϕ290 mm×58 mm	应力比：0.1
热处理状态：990℃，1 h，空冷	试验频率：13.3 Hz
+600℃，2 h，空冷	试验环境：20℃，空气
材料强度：σ_b=1 030 MPa，$\sigma_{p0.2}$=960 MPa	试样个数：2
取样方向：C-R	试验点数：52
试样类型：CT B=20 mm，W=40 mm	拟合公式：$da/dN=C(\Delta K)^n$，$C=1.17\times10^{-10}$，$n=4.65$

盘模锻件室温 da/dN-ΔK 曲线见图7.2-24。

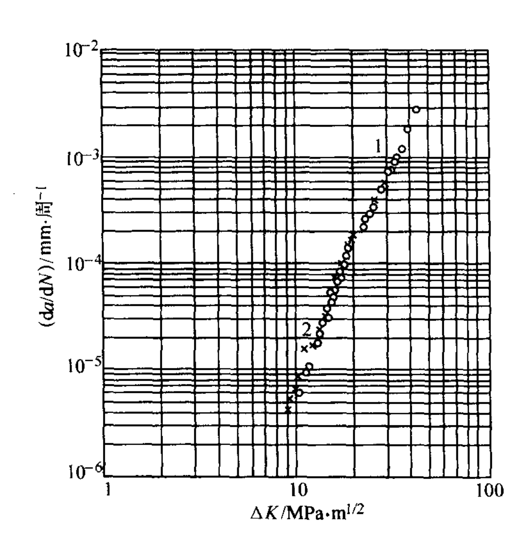


图7.2-24 TA12钛合金盘模锻件室温 da/dN-ΔK 曲线

材料品种：盘模锻件	加载方式：轴向
材料规格：ϕ470 mm×56 mm	应力比：0.1
热处理状态：965℃，1.5 h，空冷	试验频率：13.3 Hz
+945℃，1.5 h，空冷	试验环境：20℃，空气
+600℃，4 h，空冷	试样个数：3
材料强度：σ_b=993 MPa，$\sigma_{p0.2}$=906 MPa	试验点数：52
取样方向：C-R	拟合公式：$da/dN=C(\Delta K)^n$
试样类型：CT B=20 mm，W=40 mm	$C_1=6.71\times10^{-9}$，$n_1=3.37$；$C_2=6.04\times10^{-11}$，$n_2=5.07$

8.5 制造工艺和性能

1）热处理工艺和性能

① 双重退火 980℃，1~1.5 h，空冷+600℃，2 h，空冷。

② 三重退火 965℃，1~1.5 h，空冷+945℃，1~1.5 h，空冷+600℃，4 h，空冷。

叶片和棒材一般采用双重退火制度，盘和鼓筒模锻件采用三重退火制度，首次退火均允许在β转变温度以下30~50℃范围内作适当调整。

③ 去应力退火 500~550℃，1~5 h，空冷或炉冷。

④ 零件热处理工艺 在实际零件的退火工艺中，要注意首次退火的空冷条件，不允许堆冷或抽底式炉底上空冷，以免由于冷却速度过慢而影响组织性能。

2）热变形工艺和性能

① 热变形工艺塑性见图7.2-25和图7.2-26。

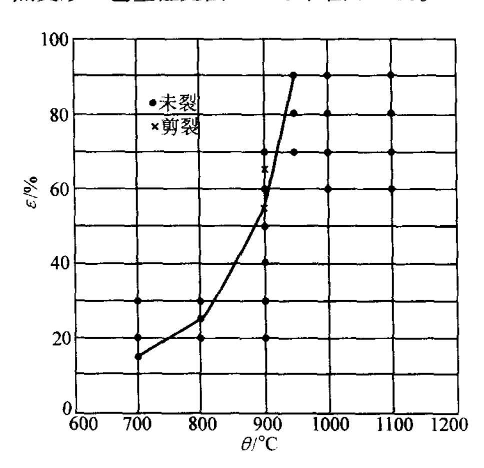


图7.2-25 TA12钛合金动态压缩工艺塑性图

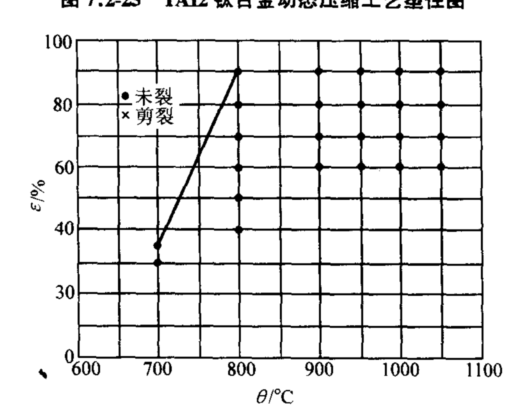


图7.2-26 TA12钛合金静态压缩工艺塑性图

② 热变形温度下的拉伸性能见图7.2-27。

③ 热变形工艺规范见表7.2-178。

8.6 选材及应用

用TA12高温钛合金制成的涡喷发动机高压压气机第六级轮盘和第五、六级鼓筒，通过了超转、破断和低周疲劳试验考核。TA12合金制造的涡喷发动机高压压气机第五级工作叶片进行试车考核，未见异常。TA12合金制成的涡喷发动机高压压气机第六级轮盘、第五、六级鼓筒和第六级转子叶片经过再次长期试车考核，试车后分解检查，均未见异常。图7.2-28为TA12钛合金压气机盘和鼓筒。图7.2-29为TA12钛合金精锻叶片。

在新型号发动机上，推荐选用TA12高温钛合金制造高

压压气机轮盘、鼓筒和叶片等零件。

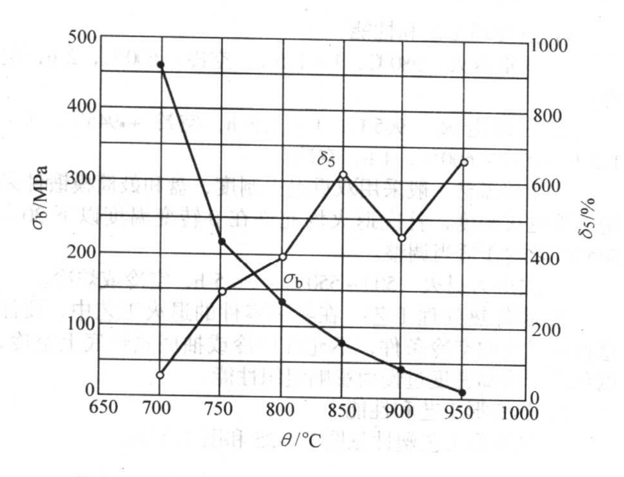


图 7.2-27 TA12 钛合金在热变形温度下的拉伸性能

表 7.2-178 TA12 钛合金热变形工艺规范

热变形类型	加热温度/℃	终止温度/℃	一火变形量/%
铸锭开坯	1 150 ~ 1 200	≥900	30 ~ 50
坯料锻造	970 ~ 1 040	≥850	30 ~ 55
棒材轧制	970 ~ 1 040	≥800	40 ~ 65
压力机模锻	970 ~ 1 030	≥800	30 ~ 55
锻锤模锻	980 ~ 1 040	≥800	30 ~ 55

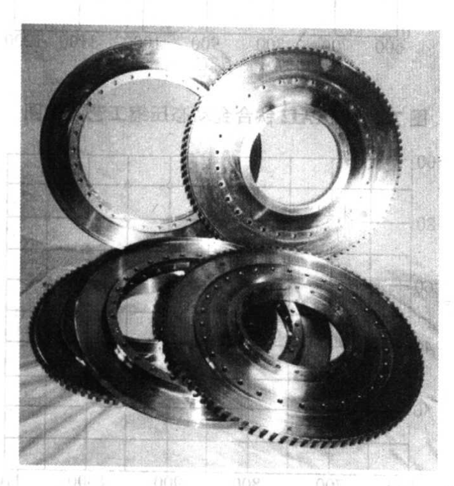


图 7.2-28 TA12 钛合金压气机盘和鼓筒

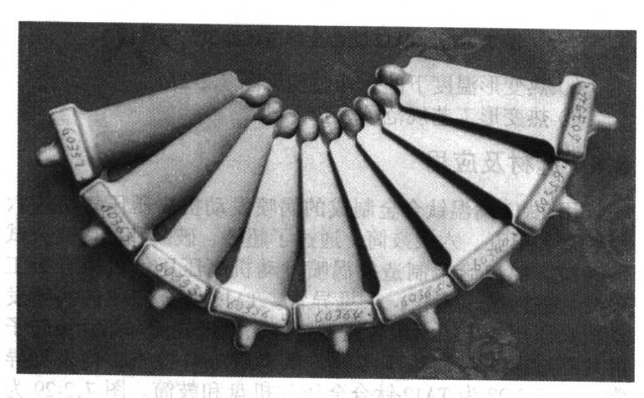


图 7.2-29 TA12 钛合金精锻叶片

9 TA18 钛合金

TA18合金是一种近 α 型钛合金，名义成分为 Ti-3Al-2.5V，是作为可冷加工的管材应用而研制的。在室温和高温下其强度比纯钛高出 20% ~ 50%，焊接性能和冷成形性能优于 TC4 合金。TA18 合金一般在退火状态下使用，也可在冷加工并去应力退火状态下使用，最高工作温度约为 315℃。

TA18 合金无缝管适用于飞机和发动机液压和燃油等管路系统。也可以轧成箔材和带材，前者多用于飞机蜂窝结构。

1）材料牌号　TA18。

2）相近牌号　Ti-3Al-2.5V（美国）。

9.1 化学成分

GJB3432—1998《航空用 Ti-3Al-2.5V 钛合金管材规范》规定的化学成分见表 7.2-179。

表 7.2-179 TA18 钛合金化学成分（质量分数）

%

合金元素			杂质，不大于							
Al	V	Ti	Fe	C	N	H	O	Y[①]	其他元素[①]	
									单个	总和
2.5 ~ 3.5	2.0 ~ 3.0	余量	0.30	0.05	0.025	0.015	0.12	0.005	0.10	0.40

① 产品出厂时供方可不检验 Y 和其他元素，用户要求并在合同中注明时可予以检验。

9.2 物理及化学性能

1）熔化温度为 1 700 ~ 1 726℃。

2）密度 $\rho = 4.47 g/cm^3$。

3）热导率见表 7.2-180。

表 7.2-180 TA18 钛合金热导率

θ/℃	100	200	300	400	500	600	700	800
$\lambda/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	11.7	13.0	13.4	14.2	14.7	16.3	17.6	19.3

4）比热容　室温的比热容为 858 J/（kg·K）。

5）线胀系数见表 7.2-181。

表 7.2-181 TA18 钛合金线胀系数

θ/℃	100	200	300	400	500	600	700	800
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	8.77	9.56	9.66	9.70	9.65	9.68	9.84	9.73

6）电阻率见表 7.2-182。

表 7.2-182 TA18 钛合金电阻率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600	700	800
$\rho/\mu\Omega \cdot m$	1.25	1.31	1.42	1.52	1.60	1.66	1.71	1.74	1.74

7）磁性能　无磁性。

8）抗氧化性能　该合金抗氧化温度可达 316℃。在 800℃下，保持 1 h，表面氧化深度不超过 0.05 mm。

9）耐腐蚀性能　一般腐蚀性能与工业纯钛相近。

10）热盐应力腐蚀性能见表 7.2-183。

9.3 相变及显微组织

1）相变温度　$\alpha + \beta \leftrightarrow \beta$ 转变温度 925℃ ± 10℃。

表 7.2-183 TA18 钛合金热盐应力腐蚀性能

热暴露应力/MPa	294							
热暴露温度/℃	350			400		450		
表面涂盐量 /mg·cm^{-2}	0	10.1	17.0	0	36.5	0	1.6	3.0～7.7
热暴露时间/h	100	100	100	100	100	53.3	45.9	4.8
室温抗拉强度/MPa	738	739	760	746	742	0	0	0

2）显微组织 合金在退火状态的组织主要是等轴α相，以及少量的β相。在冷加工状态呈现拉长的α组织。在固溶时效状态为等轴α相和β转变组织。

3）再结晶温度 开始：560℃；结束：700℃。

9.4 力学性能

1）技术标准规定的性能见表 7.2-184。

2）室温及各种温度下的力学性能

表 7.2-184 技术标准规定的 TA18 钛合金性能

技术标准	品种	d 或 δ/mm	状态	取样方向	室温					
					σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_{50}/%	ψ_5/%	ψ/%	a_{KU}/kJ·m^{-2}
GJB 3423—1998	管材	(ϕ6～50) × (0.5～2.0)	退火	L	≥620	≥515	≥15	—	—	—
Q/XB 1513—1996	板材	0.6～2.0	退火	T	≥620	≥518	—	15	—	—
Q/XB 1511—1996	棒材	8～50	退火	L	≥620	≥518	—	15	30	≥500

① 硬度 退火状态管材的室温硬度 15～27HRC。

② 拉伸性能 管材的高温拉伸性能见表 7.2-185。

表 7.2-185 TA18 钛合金管材的高温拉伸性能

品种	管材					
状态	650℃，30 min，真空退火					
规格	ϕ12 mm×0.9 mm			ϕ22 mm×0.5 mm		
θ/℃	σ_b/MPa	σ_s/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	σ_s/MPa	δ_5/%
100	660	521	20.9	565	485	44.1
150	592	479	24.0	550	472	41.5
200	598	481	17.4	532	448	41.9
300	542	427	17.4	497	413	39.5
400	503	—	16.0	461	—	30.3
470	424	—	27.0	399	—	42.6
500	400	—	26.9	387	—	51.3

管材的低温拉伸性能见表 7.2-186。

表 7.2-186 TA18 钛合金管材的低温拉伸性能

品种	d 或 δ/mm	状态	θ/℃	σ_b/MPa	σ_s/MPa	δ_{25}/%
管材	13×1.3	650℃，1 h，空冷	20	703	551	19
			-195	1 179	986	20
			-253	1 510	1 386	2
			-268	1 392	1 365	4

板材和棒材的拉伸性能见表 7.2-187。

表 7.2-187 TA18 钛合金板材和棒材的拉伸性能

品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	σ_s /MPa	δ_5 /%	ψ /%
板材	1.2	退火	T	20	645	540	—	27	—
板材	—	退火	T	20	675	—	558	18	—
				-195	1 144	—	1 048	20	—
				-253	1 220	—	1 186	2	—
				-268	1 310	—	1 310	3	—
棒材	10～25	退火	L	20	691	565	—	18	41

③ 冲击性能 棒材的室温冲击韧度见表 7.2-188。

表 7.2-188 TA18 钛合金棒材的室温冲击韧度

品种	d/mm	状态	取样方向	a_{kU}/kJ·m^{-2}
轧棒	20	退火	L	1 245
锻棒	17	退火	L	814

④ 弯曲性能 管材和板材的室温弯曲角见表 7.2-189。

表 7.2-189 TA18 钛合金管材和板材的室温弯曲角

品种	d 或 δ/mm	状态	取样方向	$\alpha(D=6d)$/(°)	$\alpha(D=3\delta)$/(°)
管材	6～25	退 火	L	180	—
板材	0.75	退火	T	—	100
	1.0	退火	T	—	100

⑤ 缺口拉伸性能 棒材和板材室温缺口拉伸性能见表 7.2-190

表 7.2-190 TA18 钛合金棒材和板材室温缺口拉伸性能

品种	d 或 δ /mm	加工方式	状态	取样方向	θ/℃	K_t	σ_{bH} /MPa	σ_{bH} /σ_b
棒材	20	热轧	750℃，1 h，空冷	L	20	2	998	1.53
						3	1 047	1.61
						5	1 041	1.60
	12	冷旋锻	750℃，1h，空冷	L	20	3	1 069	1.58
板材	1.0	冷轧	650℃，1 h，炉冷	T	20	3	797	1.10

管材和板材的室温和低温缺口拉伸性能见表 7.2-191

表 7.2-191 TA18 钛合金管材和板材的室温和低温缺口拉伸性能

品种	状态	K_t	θ/℃	σ_{bH}/MPa	σ_{bH}/σ_b
管材	650℃，1 h，炉冷	6.3	20	758	1.12
			-195	1 255	1.09
			-253	1 420	1.16

续表 7.2-191

品种	状态	K_t	θ/℃	σ_{bH}/MPa	σ_{bH}/σ_b
板材	650℃，30 min，空冷	6.3	20	758	1.12
			-195	1 255	1.10
			-253	1 441	1.18
			-268	1 482	1.13

⑥ 热稳定性　退火管材、棒材试样热暴露后的室温拉伸性能见表 7.2-192。

3）持久和蠕变性能　高温蠕变性能见表 7.2-193。

4）疲劳性能　棒材室温旋转弯曲疲劳极限见表 7.2-194。

管材轴向加载疲劳极限见表 7.2-195。

5）弹性性能

① 不同温度动态弹性模量见表 7.2-196。

表 7.2-192　TA18 钛合金管材和棒材热暴露后的室温拉伸性能

热暴露条件		管材 d 或 δ/mm						棒材 d/mm			
		650℃，30 min，炉冷						700℃，30 min，空冷			
		12×0.9			22×0.5			20			
θ/℃	t/h	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
未暴露		726	598	18.2	659	561	29.6	652	604	20.7	59.7
400	500	739	609	16.2	673	608	27.1	658	612	23.0	60.8
	1 000	736	608	16.2	653	564	29.1	646	634	21.0	58.3'
	1 500	729	607	18.0	682	587	26.7	652	629	20.0	58.2
	2 000	706	601	18.1	664	577	28.3	—	—	—	—
470	400	720	596	17.4	686	600	27.7	652	628	22.5	59.8

表 7.2-193　TA18 钛合金高温蠕变性能

品种	状态	θ/℃	$\sigma_{1.0/1000}$/MPa
管材	退火	250	400

表 7.2-194　TA18 钛合金室温旋转弯曲疲劳极限

品种	d/mm	状态	取样方向	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	K_t	R	N/周	σ_D/MPa
棒材	17	750℃，1 h，空冷	L	691	584	1	-1	10^7	343
						3	-1	10^7	176

表 7.2-195　TA18 钛合金管材轴向加载疲劳极限

品种	d 或 δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	f	N	σ_D/MPa
管材	9.5×0.7	退火	L	20	1	-1	30	10^7	320

表 7.2-196　TA18 钛合金不同温度动态弹性模量

品种	状态	d 或 δ/mm	E/GPa					
			20℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃
管材	650℃，30 min，炉冷	6×0.6	96.3	—	—	—	—	—
		10×0.75	99.0	—	—	—	—	—
		12×0.9	96.0	—	—	—	—	—
板材	650℃，30 min，炉冷	1.0	106.0	100.5	92.6	85.6	79.3	74.2

② 切变模量　退火棒材的室温剪切弹性模量 G = 39.6 GPa。

③ 泊松比　室温泊松比 μ = 0.39。

6）断裂性能　板材的室温断裂韧度见表 7.2-197。

表 7.2-197　TA18 钛合金板材的室温断裂韧度

品种	δ/mm	状态	取样方向	K_C/MPam$^{1/2}$
板材	19	750℃，1 h，空冷	L-T	90.3
			T-L	89.5

9.5 制造工艺和性能

1）热处理工艺

① 普通退火　板材、棒材、管材、锻件：650℃～800℃，0.5～2 h，空冷。

② 真空退火　650℃～790℃，0.5～2 h，炉冷至 200℃以下出炉空冷，炉内绝对压强不应大于 9×10^{-2} Pa。

③ 去应力退火　去除零件成形、焊接和机械加工时形成的内应力退火：370℃～600℃，0.5～4 h，空冷或炉冷。

2）成形性能

① 管材的展平和压扁性能见表 7.2-198。

表 7.2-198　TA18 钛合金管材的展平和压扁性能

品种	d 或 δ/mm	状态	展平①	压扁间距
管材	6×0.6	650℃，1 h，炉冷	—	7δ②
	8×0.75	700℃，1 h，炉冷	裂	—
	10×0.75	700℃，1 h，炉冷	不裂	6δ
	22×0.5	650℃，1 h，炉冷	—	≤6δ
	30×0.9	700℃，1 h，炉冷	不裂	—
	36×0.5	650℃，1 h，炉冷	不裂	≤6δ
	12×0.9	380℃，1 h，炉冷	—	8δ
	22×0.5	380℃，1 h，炉冷	—	7δ

① 沿轴向剖开的半管在两平行面板间逐渐压至板间距等于管材名义壁厚。

② 管材壁厚。

② 管材的扩口性能见表7.2-199。

表7.2-199 TA18钛合金管材的扩口性能

品种	d或δ/mm	状态	扩口率/%①
管材	6×0.6	650℃，30 min，炉冷	41.6
	10×0.75	700℃，1 h，炉冷	44.9
	12×0.9	650℃，30 min，炉冷	40.2
	20×0.75	700℃，1 h，炉冷	42.5
	22×0.5	650℃，30 min，炉冷	>35.1
	30×0.9	700℃，1 h，炉冷	51.7
	36×0.5	650℃，30 min，炉冷	>34.4
	44×0.9	700℃，1 h，炉冷	44.3
	52×1.0	700℃，1 h，炉冷	45.2
	12×0.9	冷变形+380℃，30 min，炉冷	>20
	22×0.5		>20

① 扩口采用锥度74°的顶芯，扩口率按下式计算：

$$扩口率 = \frac{d_f - d_0}{d_0} \times 100\%$$

式中，d_f为扩口后扩口处的最大外径；d_0为管材外径。

③ 管材的弯曲性能见表7.2-200。

表7.2-200 TA18钛合金管材的弯曲性能

品种	状态	d或δ/mm	弯芯直径	弯曲角/(°)	回弹角(°)	弯曲处壁厚最大减薄量/%
管材	退火	6×0.6	4d①	180	8	8
		10×0.75	4d①	180	12	8.5
		12×0.9	4d①	180	22	9.5
		10×0.75	6d②	180	69	5
		12×0.75	6d②	180	74	8

① 弯曲时管内填充软钢棒。
② 弯曲时管内填充松香。

3）热变形工艺规范见表7.2-201。

表7.2-201 TA18钛合金热变形工艺规范

热变形类型	加热温度/℃	终止温度/℃	一火变形量/%
铸锭开坯	1 000～1 050	≥750	50～70
坯料锻造	900～950	≥750	50～70
管坯挤压	740～880	≥700	40～70
管坯斜轧穿孔	950～980	≥800	40～70
棒材轧制	800～850	≥700	40～80
板材轧制	800～880	≥750	40～60

4）焊接工艺和性能

① 自动焊接接头的力学性能见表7.2-202。

表7.2-202 TA18钛合金自动焊接接头的力学性能

焊接方法	品种	d或δ/mm	状态焊前/焊后	σ_b/MPa	δ_5/%	η/%	断裂部位
电子束焊接	管	12×0.9	退火/未焊	740	21.0	95	焊缝
			退火/未处理	700	14.0		
		22×0.5	退火/未焊	740	44	97	热影响区
			退火/未处理	718	16.8		
	板	1.0	退火/未焊	737	16.9	95	焊缝
			退火/未处理	701	14.2		

续表7.2-202

焊接方法	品种	d或δ/mm	状态焊前/焊后	σ_b/MPa	δ_5/%	η/%	断裂部位
自动氩弧焊接	管	10×0.75	退火/未焊	730	21.5	95	焊缝
			退火/未处理	695	6.0		
		12×0.9	退火/未焊	748	17.3	98	焊缝
			退火/未处理	736	7		
		22×0.5	退火/未焊	672	40	99	基材
			退火/未处理	664	37.4		
	板	1.0	退火/未焊	737	16.9	99	热影响区
			退火/未处理	731	14.0		
		0.75	退火/未焊	632	—	100	热影响区
			退火/未处理	647	—		
			冷轧/退火	637	—	100	基材

② 手工氩弧焊对接接头的力学性能见表7.2-203。

表7.2-203 TA18钛合金手工氩弧焊对接接头的力学性能

品种	d或δ/mm	状态焊前/焊后	σ_b/MPa	δ_5/%	η/%	断裂部位
管材	20×0.75	退火/未焊	688	—	98	基材
		退火/未处理	676	—		
		退火/去应力退火	698	—	100	基材
	30×0.9	退火/未焊	650	—	100	基材
		退火/未处理	651	—		
管棒对焊	8×0.75管 8.0棒	退火/未焊	661	—	98	管基材
		退火/未处理	645	—		
		退火/去应力退火	718	—	100	管基材

9.6 选材及应用

1）选材 TA18钛合金是美国研制的管材合金，早在20世纪70年代就在美国高科技军用、航天和民用多种飞机上作为液压、燃油等管路系统应用，90年代初在我国运输机的空调管路也应用过，并将在航空发动机管路系统中应用。近年来作为形状复杂、中等强度、可焊接喷火器的火枪也取得批量应用。

TA18钛合金在民用各行业中，如：石油探井仪表外套管件、换热器管件、钛钓鱼竿的杆体，眼镜架异型丝材，高尔夫球杆等也取得良好的应用。

一般来说，该合金适用于制造工作温度在315℃以下要求强度，抗氧化性能、可成型和焊接性能的部件。除管材外也可以生产板、带、箔、丝材等。

2）功能考核试验

① 管材液压爆破试验见表7.2-204。

表7.2-204 TA18钛合金管材液压爆破试验

品种	d或δ/mm	状态	理论计算值①/MPa	实验值/MPa	爆破部位
无缝管	12×0.9	冷加工+380℃，1 h，炉冷	161	153	不破
	22×0.5	冷加工+380℃，1 h，炉冷	46	69	管接头焊缝处

续表 7.2-204

品种	d 或 δ /mm	状态	理论计算值①/MPa	实验值 /MPa	爆破部位
无缝管	12×0.75	700℃，30 min，炉冷	91.3	106	管体
	12×0.9	650℃，30 min，炉冷	124.5	143~158	管体
	14×0.75	700℃，30 min，炉冷	78.9	92	管体
	22×0.5	650℃，30 min，炉冷	34.0	42.8~48	管体
	34×0.9	700℃，30 min，炉冷	37.9	44	管体
带有环焊缝管	12×0.9	650℃，30 min，炉冷+焊接	120.3	143~163	环焊缝
	22×0.5	650℃，30 min，炉冷+焊接	32.5	45~49	环焊缝

① 爆破压力计算公式：$P_b = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s\left(2-\frac{\sigma_s}{\sigma_b}\right)\ln K$

式中，P_b 为爆破压力，MPa；σ_s 为管材的屈服点，MPa；σ_b 为管材的抗拉强度，MPa；K 为管材的外径与内径之比。

② 导管的气密试验及液压强度试验见表 7.2-205。

表 7.2-205 TA18 钛合金导管的气密试验及液压强度试验

品种	d 或 δ /mm	状态	工作压力① /MPa	试验压力② /MPa	试验结果
导管	6×0.6	退火	21	42	合格
	10×0.75		21	42	合格
	12×0.9		21	42	合格

① 保压 5 min。
② 保压 10 min。

③ 导管的振动疲劳试验见表 7.2-206。
④ 导管的液压脉冲疲劳试验见表 7.2-207。

表 7.2-206 TA18 钛合金导管的振动疲劳试验

品种	d 或 δ /mm	试验压力 /MPa	f/Hz	加速度/g	振动次数
导管	6×0.6	21	52	8.8	$>10^7$
	10×0.75	21	76	3.6	$>10^7$
	12×0.9	21	90	5.4	$>10^7$

表 7.2-207 TA18 钛合金导管的液压脉冲疲劳试验

品种	d 或 δ /mm	状态	工作压力 /MPa	峰值压力 /MPa	脉冲频率 /min⁻¹	脉冲次数
导管	6×0.6	退火	21	31.5	70	7 210 100
	10×0.75		21	31.5	70	7 211 050
	12×0.9		21	31.5	70	7 211 050

10 TA19 钛合金

TA19 合金是一种近 α 型钛合金，其名义成分为 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo，含有 α 稳定元素 Al，中性元素 Sn 和 Zr，同晶型 β 稳定元素 Mo，共析型 β 稳定元素 Si。Mo 能提高室温和高温抗拉强度，增强稳定性；而 Al、Sn 和 Zr 的综合作用，可保持长时间持久和蠕变的高温强度；添加 Si 会引起某种硅化物弥散相的沉淀，有利于改善高温蠕变强度。

该合金直到 540℃还具有较高的强度，超过了 TA11 合金。其比强度比 TA14（Ti679）合金优越，而蠕变性能比 TA11 合金还好，与 TA14 合金相当。主要用于制造航空发动机的压气机机匣和飞机蒙皮等，最高的长期工作温度为 500℃。

1）材料牌号　TA19，ZTC6。
2）相近牌号　Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo（美国）。

10.1 化学成分

XJ/BS 5128—1995《Ti-6242 钛合金棒材技术协议》；GJB 2896—1997《钛及钛合金熔模精密铸件规范》和 Q/3B 4021—1992《航空发动机机匣用 Ti-6242 钛合金等温锻件规范》规定的化学成分见表 7.2-208。

表 7.2-208 TA19 钛合金化学成分（质量分数）　%

牌号	合金元素					杂质≤							
	Al	Sn	Zr	Mo	Ti	Si	Fe	C	N	H	O	其他元素 单个	其他元素 总和
TA19	5.5~6.5	1.8~2.2	3.6~4.4	1.8~2.2	余量	0.13	0.25	0.05	0.05	0.012 5	0.15	0.1	0.3
ZTC6	5.75~6.50	1.75~2.25	3.5~4.5	1.75~2.25	余量	0.13	0.12	0.10	0.05	0.012 5	0.15	—	0.3

10.2 物理及化学性能

1）密度 $\rho = 4.53\ g/cm^3$。
2）熔化温度范围 1 588~1 715℃。
3）热导率见表 7.2-209。

表 7.2-209 TA19 钛合金热导率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
$\lambda/W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	6.8	7.4	8.6	9.7	10.9	12.1	13.2

4）比热容见表 7.2-210。

表 7.2-210 TA19 钛合金比热容

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
$c/J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$	528	539	557	574	590	608	626

5）线胀系数见表 7.2-211。

表 7.2-211 TA19 钛合金线胀系数

θ/℃	20~100	20~200	20~300	20~400	20~500	20~600
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	8.7	8.6	9.5	9.7	9.9	10.0

6）磁性能　无磁性。

7）抗氧化性能　参见 TC4 钛合金。

8）耐腐蚀性能　TA19 合金具有良好的耐腐蚀性能。然而，对热盐应力腐蚀也存在着一定的敏感性，而且具有在室温盐水溶液环境中裂纹试样的延迟断裂。该合金对盐应力腐蚀比 TA14 合金更敏感，但比 TC4、TA11 和 TA7 合金敏感性小。

10.3　相变及显微组织

1）相变温度　α+β↔β 转变温度为 990℃±10℃。

2）时间-温度-组织转变曲线见图 7.2-30。

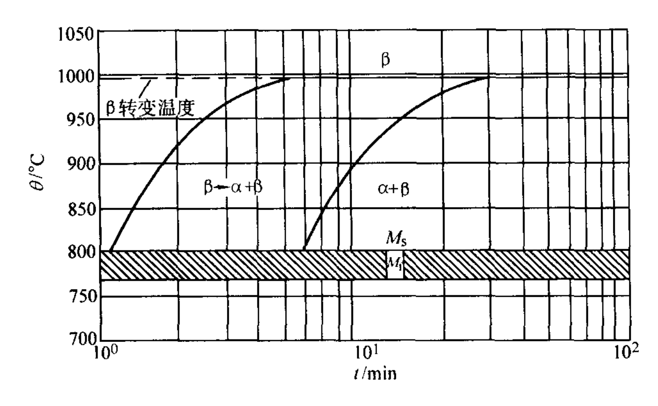


图 7.2-30　TA19 合金时间-温度-组织转变曲线

3）合金组织结构　TA19 合金的典型组织是分布在转变 β 基体上的粗大等轴 α 相。薄板组织中的等轴 α 相往往比锻件的小，而等轴 α 相的比例要比锻件的多。合金铸造组织由粗大的针状 α 相和少量的转变 β 所组成。晶内 α 相以网蓝状和集束状两种形态存在，而转变 β 位于 α 相界面附近。铸态组织具有 α-β 型铸造钛合金的典型魏式组织特征。

10.4　力学性能

1）技术标准规定的性能见表 7.2-212。

表 7.2-212　TA19 钛合金技术标准规定的性能

技术标准	品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	室温			
					σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
XJ/BS 5128—95	棒材	90 熔检样	双重退火	L	≥895	≥825	≥10	≥25
Q/16GJX 0274—93	环形锻件	—	双重退火	C	≥895	≥825	≥10	≥25
GJB 2896—97	精密铸件	附铸试样	退火或热等静压	—	≥860	≥795	≥5	≥10
Q/3B 4021—92	等温锻件	—	双重退火	—	≥896	≥827	≥10	≥25

技术标准	品种	480℃				525℃	
		σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5%	ψ/%	σ/MPa	t/h
XJ/BS 5128—95	棒材	≥620	≥485	≥15	≥35	≥480	≥68
Q/16GJX 0274—93	环形锻件	≥620	≥485	≥15	≥35	≥480	≥68
Q/376B 4021—92	等温锻件	≥620	≥485	≥10	≥35	≥480	≥35

2）室温及各种温度下的力学性能

① 硬度　室温硬度见表 7.2-213。

表 7.2-213　TA19 钛合金硬度

品种	δ/mm	状态	HB
棒材	90×90	双重退火	309
环形铸件	—	600℃，2 h，空冷	300
		800℃，2 h，空冷	295
		热等静压+800℃，2 h，空冷	289

② 拉伸性能　棒材在各种温度下的拉伸性能见表 7.2-214。

表 7.2-214　TA19 钛合金棒材在各种温度下的拉伸性能

品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_b	$\sigma_{p0.2}$	$\sigma_{p0.01}$	δ_5	ψ
					MPa			%	
棒材	12	双重退火	L	20	1 100	1 015	912	18.0	45.0
				100	1 025	920	729	14.0	48.0
				200	933	807	647	16.0	50.0
				300	875	720	620	15.0	54.0
				400	825	654	549	15.0	57.0
				500	797	629	515	17.0	64.0
	90×90			20	1 056	998	—	15.0	36.0
				480	739	583	—	19.0	51.0

环形件在各种温度下的拉伸性能见表 7.2-215。

表 7.2-215　TA19 钛合金环形件在各种温度下的拉伸性能

品种	d 或 δ /mm	取样方向	状态	θ/℃	σ_b	$\sigma_{p0.2}$	δ_5	ψ
					MPa		%	
环形件	732×438	C	双态退火	20	1 021	959	15.0	37.0
				480	699	543	18.5	50.0
	—	—	600℃/2 h，空冷	20	885	800	7.5	20.5
			热等静压		891	800	7.0	20.0
			热等静压+800℃/2 h，空冷		885	816	8.0	18.0
	—	—	800℃/2 h，空冷	20	898	824	8.0	21.0
				300	632	537	9.5	24.5
				400	597	501	11.0	29.5
				450	592	495	12.0	26.5
				500	568	475	10.5	30.0
				550	560	470	13.0	33.5

棒材的拉伸应力-应变曲线见图 7.2-31。

③ 冲击性能见表 7.2-216。

④ 扭转与剪切性能　扭转性能见表 7.2-217。

剪切性能见表 7.2-218。

⑤ 承载性能见表 7.2-219。

⑥ 应力集中见表 7.2-220。

⑦ 热稳定性　试样热暴露后的室温拉伸性能见表 7.2-221。

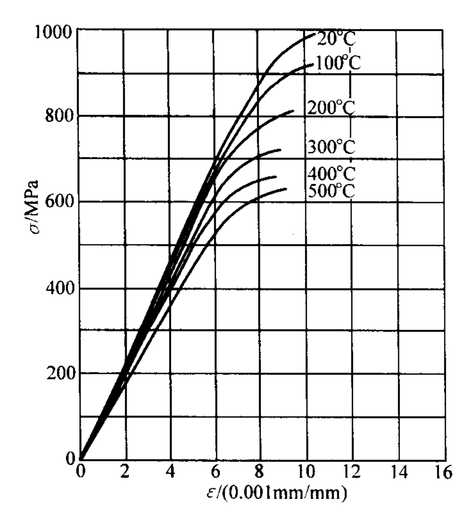


图 7.2-31　TA19 合金棒材双重退火的拉伸应力-应变曲线

表 7.2-216　TA19 钛合金冲击性能

品种	D 或 δ /mm	状态	取样方向	θ/℃	a_{KU} /kJ·m^{-2}
棒材	16	双重退火	L	20	350
棒材	90×90	双重退火	L	20	330
环形锻件	732×437	双重退火	C	20	331
环形锻件	—	600，2 h，空冷	—	20	590
环形锻件	—	800，2 h，空冷	—	20	578
环形锻件	—	热等静压 + 800，2 h，空冷	—	20	582

表 7.2-217　TA19 钛合金扭转性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	τ_b	$\tau_{p0.3}$	$\tau_{p0.01}$
					MPa		
棒材	16	双重退火	L	20	940	671	529
				100	885	588	458
				200	827	506	402
				300	794	453	351
				400	753	427	327
				500	698	401	283
环形铸件	—	800℃，2 h，空冷	—	20	760	579	419

表 7.2-218　TA19 钛合金剪切性能

品种	状态	θ/℃	τ/MPa
环形铸件	800℃，2 h，空冷	20	659
		500	432

3）持久和蠕变性能

① 高温持久性能见表 7.2-222。

② 高温蠕变性能见表 7.2-223。

③ 棒材的持久应力-寿命曲线见图 7.2-32。

表 7.2-219　TA19 钛合金承载性能

品种	δ/mm	状态	θ/℃	e/D	σ_{bru}/MPa		σ_{bry}/MPa	
					A	B	A	B
板材	1.2～2.3	双重退火	20	1.5	1 413	1 496	1 178	1 262
				2.0	1 675	1 779	1 393	1 496
	2.4～3.6	双重退火	20	1.5	1 475	1 565	1 179	1 262
				2.0	1 834	1 944	1 393	1 496

表 7.2-220　TA19 钛合金应力集中

品种	D/mm	状态	取样方向	K_t	θ/℃	σ_{bH} /mm	σ_{bH}/σ_b
棒材	16	双重退火	L	3	20	1 676	1.52
					100	1 553	1.51
					200	1 411	1.51
					300	1 299	1.48
					400	1 211	1.47
					500	1 185	1.49
环形铸件	—	800℃，2 h，空冷	—	2.5	20	11 394	1.56

表 7.2-221　TA19 钛合金热稳定性

品种	状态	热暴露条件			σ_b	$\sigma_{p0.2}$	δ_5	ψ
		θ/℃	σ/MPa	t/h	MPa		%	
环形铸件	800℃，2 h，空冷	未暴露			898	817	9.0	19.5
		450	350	100	887	817	7.0	21.0
			400	100	900	833	7.0	20.0
		500	300	100	900	834	7.5	20.0
			350	100	899	840	8.0	21.0
			400	100	905	855	8.0	18.0

表 7.2-222　TA19 钛合金高温持久性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_{100}/MPa	σ_{500}/MPa
棒材	16	双重退火	L	300	—	632
				500	—	545
环形锻件	—	800℃，2 h，空冷	—	450	560	—
				500	510	—
		热等静压 + 800℃，2 h，空冷	—	500	500	—

表 7.2-223　TA19 钛合金高温蠕变性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	$\sigma_{0.2/100}$ /MPa	$\sigma_{0.1/500}$ /MPa
棒材	20	双重退火	L	300	—	632
				500	—	200
环形锻件	—	800℃/2 h，空冷	—	500	250	—

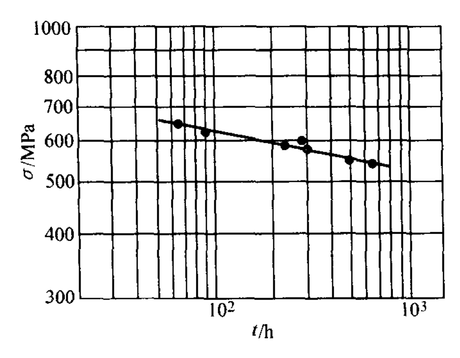


图7.2-32 TA19合金棒材500℃持久应力-寿命曲线

材料品种：棒材　　持久方程：$\lg\sigma = 2.9517 - 0.0761\lg t$

材料规格：ϕ16 mm

取样方向：L　　相关系数：0.977

热处理状态：970℃/1 h，空冷 + 595℃/8 h，空冷

④ 棒材的蠕变应力-寿命曲线见图7.2-33。

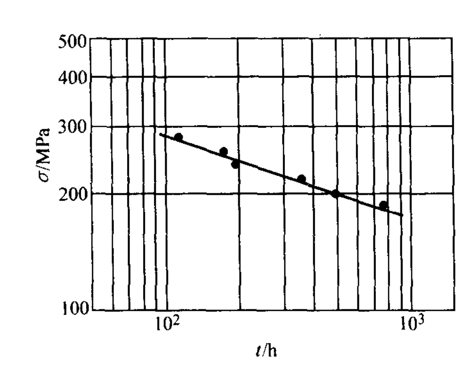


图7.2-33 TA19合金500℃ 0.1%塑性应变的蠕变应力-寿命曲线

材料品种：棒材

材料规格：ϕ20 mm

取样方向：L

热处理状态：970℃，1 h，空冷 + 595℃8 h，空冷

4）疲劳性能

① 高周疲劳　轴向加载疲劳极限见表7.2-224。

表7.2-224 TA19钛合金轴向加载疲劳极限

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	f/Hz	N/周	σ_b/MPa
棒材	16	双重退火	L	20	1	0.5	94	10^7	910
						0.1			753
						-1			485
				500	1	0.5	150	10^7	700
						0.1			617
						-1			397
环形铸件	—	800℃/2 h，空冷	—	20	1	0.1	150	10^7	360
					3	0.1			260
		热等静压 + 800℃/2 h，空冷	—	20	3	0.1	150	10^7	340

棒材光滑试样室温轴向加载疲劳 S-N 曲线见图7.2-34。

棒材光滑试样500℃轴向加载疲劳 S-N 曲线见图7.2-35。

② 低周疲劳　应力控制低周疲劳性能见表7.2-225。

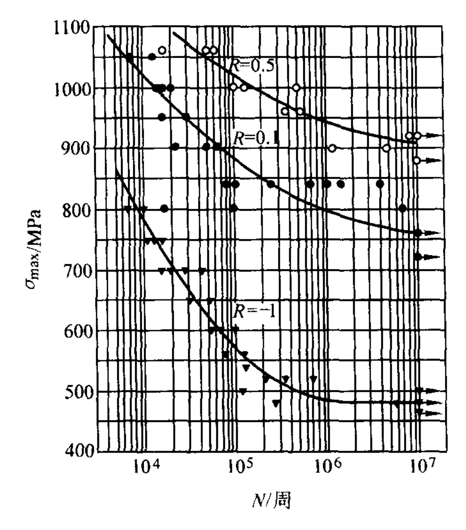


图7.2-34 TA19合金棒材500℃持久应力-寿命曲线

材料品种：棒材　　材料强度：σ_b = 1 100 MPa

材料规格：ϕ16 mm　　$\sigma_{p0.2}$ = 1 015 MPa

热处理状态：970℃/1 h，空冷 + 595℃/8 h，空冷

取样方向：L　　试样尺寸：d = 5 mm

加载方式：轴向　　应力比：0.5，0.1，-1

试验频率：10，94 Hz　　试验环境：20℃，空冷

试样数：75

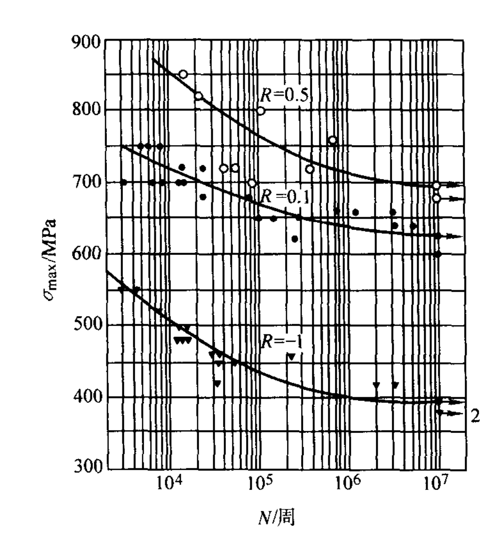


图7.2-35 TA19合金棒材光滑试样500℃轴向加载疲劳 S-N 曲线

材料品种：棒材　　材料强度：20℃　σ_b = 1 100 MPa

$\sigma_{p0.2}$ = 1 015 MPa

材料规格：ϕ16 mm　　500℃　σ_b = 797 MPa

$\sigma_{p0.2}$ = 629 MPa

热处理状态：970℃/1 h，空冷 + 595℃/8 h，空冷

取样方向：L　　试样尺寸：d = 5 mm

加载方式：轴向　　应力比：0.5，0.1，-1

试验环境：500℃，空气　　试样数：61

5）弹性性能

① 弹性模量　拉伸弹性模量见表7.2-226。

室温压缩弹性 E_C = 124 GPa。

② 切变模量见表7.2-227。

③ 泊松比见表7.2-228。

6）断裂性能

① 断裂韧度见表7.2-229。

表 7.2-225　TA19 钛合金低周疲劳性能

品种	状态	θ /℃	K_t	R	f /Hz	K	σ_{max} /MPa	N /周
环形铸件	800℃，2 h，空冷	20	2.4	0.1	0.17	0.4	474	106 705
						0.5	593	34 509
						0.6	712	8 039
						0.7	830	330
	热等静压 +800℃，2 h，空冷	20	2.4	0.1	0.17	0.5	594	35 433

表 7.2-226　TA19 钛合金弹性模量

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	E/GPa
棒材	12	双重退火	L	20	119.0
				100	113.0
				200	107.5
				300	104.0
				400	98.0
				500	90.0

表 7.2-227　TA19 钛合金切变模量

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	G/GPa
棒材	16	双重退火	L	20	44.0
				100	43.0
				200	40.5
				300	38.0
				400	36.0
				500	33.5

表 7.2-228　TA19 钛合金泊松比

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	μ
棒材	12，16	双重退火	L	20	0.34
				100	0.32
				200	0.32
				300	0.37
				400	0.34
				500	0.34

表 7.2-229　TA19 钛合金断裂韧度

品种	δ/mm	状态	试样类型	取样方向	θ/℃	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$
锻坯	30×60 ×240	双重退火	CT	T-L	20	46.0

② 疲劳裂纹扩展速率　锻坯室温 da/dN-ΔK 曲线见图 7.2-36。

环形铸件室温 da/dN-ΔK 曲线见图 7.2-37。

10.5　制造工艺和性能

1）热处理工艺和性能

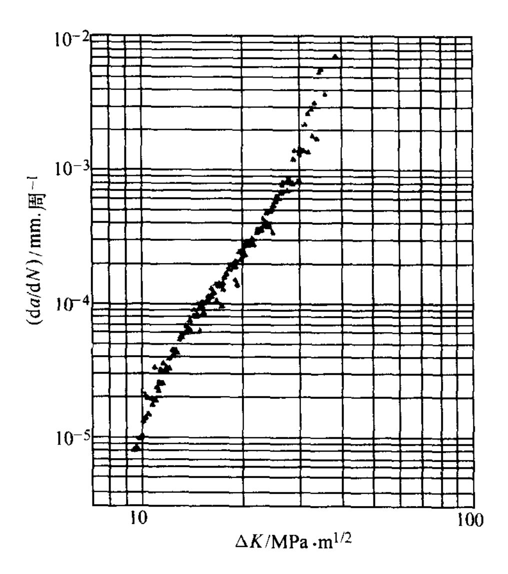


图 7.2-36　TA19 合金锻坯室温 da/dN-ΔK 曲线

材料品种：锻坯

材料规格：δ30 mm×60 mm×240 mm

热处理状态：970℃/1 h，空冷+595℃/8 h，空冷

取样方向：T-L

试样类型：CT　B=10 mm，W=40 mm　加载方式：轴向

应力比：0.1　试验频率：15 Hz　试验环境：20℃

试样数：3　试验点数：133

拟合公式：$da/dN = C\ (\Delta K)^n$　$C = 2.678\times10^{-9}$

$n = 3.812$

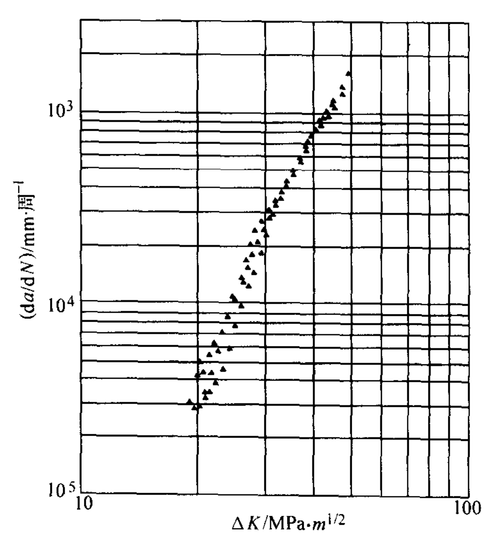


图 7.2-37　ZTC6 合金环形铸件室温 da/dN-ΔK 曲线

材料品种：环形铸件　热处理状态：800℃/2 h，空冷

试样类型：CT　B=20 mm，W=40 mm

加载方式：轴向　应力比：0.1

试验频率：10 Hz　试验环境：20℃，空气

试样数：3　试验点数：92

拟合公式：$da/dN = C\ (\Delta K)^n$　$C = 1.917\times10^{-10}$　$n = 4.130$

① 双重退火　棒材和锻件：970℃，1 h，空冷+595℃，8 h，空冷；

板材：900℃，10～30 min，空冷+790℃，15 min，空冷。

② 三重退火（板材）900℃，10～30 min，空冷+790℃，15 min，空冷+595℃，2 h，空冷。

③ 去应力退火　480～650℃，1～4 h，空冷或炉冷。

④ 普通退火（铸件）700～800℃，1～2 h，空冷或炉冷。

⑤ 热等静压处理（铸件）900℃ ± 10℃，100～110 MPa，2 h，随炉冷至250℃以下出炉。

⑥ 去应力退火（铸件）580～620℃，1～2 h，空冷或炉冷。

2）热变形工艺和性能　热变形工艺规范见表7.2-230。

表7.2-230　TA19钛合金热变形工艺规范

热变形类型		加热温度/℃	终止温度/℃	一火变形量/%
铸锭开坯		1 100～1 150	≥850	30～60
坯料锻造	≤100 mm	950～1 000	≥800	40～70
	>100 mm	950～1 050	≥800	40～70
压力机模锻		920～950	≥800	40～70
锻锤模锻		950～980	≥800	40～70

3）铸造性能　合金中含有Al和Sn，具有良好的铸造性能，易于成形，无热裂倾向。可在适宜于浇铸钛合金的铸型中铸造各种不同形状、尺寸、壁厚的异形铸件。

4）焊接性能　TA19合金可进行点焊、缝焊、钨极氩弧焊和电子束焊。钨极氩弧焊的接头强度系数可达100%，但焊接区的塑性不高。

10.6 选材及应用

1）航空发动机的机匣见图7.2-38。

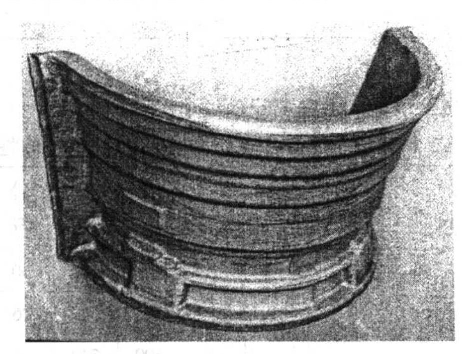


图7.2-38　TA19钛合金机匣等温锻件

2）机匣用料　原材料为φ160 mm的棒材，符合XK/BS 5157—1994规定的技术标准。

3）机匣的技术标准及等温锻件达到的性能指标见表7.2-231～表7.2-233。

表7.2-231　TA19钛合金等温锻件的力学性能

θ/℃	批次	σ_b/MPa	$\sigma_{P0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
20	1	1 060	1 020	15	28.0
		1 030	1 010	15	28.0
	2	1 010	985	12	34.0
		1 020	995	17	33.0
	标准	≥896	≥827	≥10	≥25.0
480	1	730	675	19	54.0
		765	720	22	58.0
	2	690	595	18	55.0
		710	645	19	55.0
	标准	≥620	≥485	≥10	≥35.5

表7.2-232　TA19钛合金等温锻件525℃持久性能

θ/℃	σ/MPa	1批	2批	锻件标准
525	480	t>35 h	t>35 h	t≥35 h
		t>35 h	t>35 h	

表7.2-233　TA19钛合金等温锻件的510℃蠕变性能

θ/℃	σ/MPa	1批	2批	锻件标准
510	240	ε=0.053%	ε=0.063%	残余变形量 ε≤0.1%
		ε=0.049%	ε=0.047%	

11 TA21钛合金

TA21（Ti-1Al-1Mn）钛合金是低合金化的Ti-Al-Mn系近α型钛合金，含有1%α稳定元素Al，对α相起固溶强化作用；还含有1%共析型β稳定元素Mn，有利于工艺塑性的提高。TA21钛合金名义成分的铝当量为2.0，钼当量为1.7。TA21钛合金的特点是低强度、高工艺塑性，良好的焊接性能和热稳定性，长时间工作温度为300℃。

TA21钛合金的主要半成品形式是板材、带材和管材，也用于制造棒材、型材、锻件和模锻件。合金在退火状态使用，不能通过固溶时效处理进行强化。TA21钛合金能够在室温下进行冲压成形，并用各种方式进行焊接，在航空和航天工业中获得了广泛应用。

1）材料牌号　TA21。

2）相近牌号　OT4-0（俄罗斯）。

11.1 化学成分

11－CL－96A规定的化学成分见表7.2-234。

表7.2-234　TA21钛合金化学成分（质量分数）

%

合金元素			杂质≤							
Al	Mn	Ti	C	Fe	Si	Zr	O	N	H	其他杂质总和
0.4～1.5	0.5～1.3	余量	0.10	0.30	0.12	0.30	0.15	0.05	0.012	0.30

11.2 物理及化学性能

1）密度 $\rho = 4.51\ g/cm^3$。

2）热导率见表7.2-235。

表7.2-235　TA21钛合金热导率

θ/℃	100	200	300	400	500	600	700	800	900
$\lambda/W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	13.0	13.8	14.2	15.1	16.3	17.6	18.0	18.8	20.1

3）比热容见表7.2-236。

表7.2-236　TA21钛合金比热容

θ/℃	100	200	300	400	500	600	700	800	900
$c/J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$	544	586	628	670	712	755	838	879	921

4）线胀系数见表7.2-237。

表 7.2-237 TA21 钛合金线胀系数

θ/℃	20~100	20~200	20~300	20~400	20~500	20~600	20~700
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	8.0	8.2	8.5	8.7	8.9	9.1	9.3

5）电阻率见表 7.2-238。

表 7.2-238 TA21 钛合金电阻率

θ/℃	20	100
ρ/μΩ·m	0.767	0.910

6）磁性能 无磁性。

7）抗氧化性能 与工业纯钛相近。

8）耐腐蚀性能 与工业纯钛相近。

11.3 相变及显微组织

1）相变温度 α+β↔β 转变温度为 900℃±20℃。

2）显微组织 合金在平衡状态下由α相和不到2%的少量β相组成。当合金加热至α+β相区的下部并快速冷却时，得到α相和保留β相。从α+β相区上部（例如890℃）快速冷却时，得到α′马氏体相和少量α相。从β相区快速冷却时，不能将β相固定下来，而是100%的α′马氏体相。

3）再结晶温度 开始：680℃；结束：800℃。

11.4 力学性能

1）技术标准规定的力学性能见表 7.2-239。

2）各种温度下的力学性能。

表 7.2-239 技术标准规定的 TA21 钛合金室温力学性能

技术标准	品种	状态	d 或 δ/mm	取样方向	室温				
					σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ①/%	φ/%	a_K/J·cm^{-2}
11-CL-096A	冷轧管	退火	12~16		490~635	≥320	≥15	—	—
			>16~27		490~635	≥320	≥18	—	—
	热轧管	退火			430~635	≥320	≥12	—	—
OCT/90173	轧棒	退火	10~60	L	490~635	—	≥20	≥40	≥68.5
OCT/90218	板材	退火	0.3~0.4	LT	490~635	—	≥25		—
			>0.4~1.8		490~635	—	≥30		
			>1.8~6.0		490~635	—	≥25		
			≥6.0~10.5		490~635	—	≥20		

① 对于管材为 $\delta_{11.3/\sqrt{F}}$。对于轧棒和板材为 δ_5。

① 硬度 退火状态的室温硬度 HB=200。

② 拉伸性能 各种温度下的拉伸性能见表 7.2-240。

表 7.2-240 TA21 钛合金各种温度下的拉伸性能

品种	d 或 δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	σ_p/MPa	δ_{10}/%	φ/%
棒材	20	退火	L	250	333	235	206	18	60
				300	294	196	186	14	—
				400	284	186	167	13	—
				500	284	167	127	15	—
板材	2.0	退火	LT	20	539	490	245	15	40
				250	323	274	176	20	—
				300	314	255	118	15	—
				400	284	245	118	10	—

③ 冲击性能 退火棒材的室温冲击韧性 a_{Ku}=1 000 kJ/m²。

④ 弯曲性能见表 7.2-241。

表 7.2-241 TA21 钛合金弯曲性能

品种	δ/mm	状态	α（D=2δ）/（°）
板材	0.3~0.6	退火	≥140
	0.7		≥130
	0.8		≥120
	1.0		≥110
	1.2		≥100
	1.5		≥90
	>1.5~10.5		≥80

⑤ 热稳定性见表 7.2-242。

表 7.2-242 TA21 钛合金热暴露后的室温拉伸性能

品种	δ/mm	状态	取样方向	热暴露条件		σ_b/MPa	δ_5/%	α/（°）
				θ/℃	t/h			
板材	2.0	退火	LT	未暴露		539	30	80
				200	500	549	26	78
				300	500	549	25	76
				450	500	559	20	73

3）持久和蠕变性能

① 高温持久性能见表 7.2-243。

表 7.2-243 TA21 钛合金高温持久性能

品种	d 或 δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_{100}/MPa	σ_{500}/MPa
板材	1.0~2.0	退火	LT	250	343	—
				300	314	294
				400	294	—
棒材	20	退火	L	300	333	—

② 高温蠕变性能见表 7.2-244。

表 7.2-244 TA21 钛合金高温蠕变性能

品种	d 或 δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	$\sigma_{0.2/100}$/MPa
板材	1.0~2.0	退火	LT	250	294
				300	255
				400	147
棒材	20	退火	L	300	196
				400	157

4）疲劳性能

① 旋转弯曲疲劳极限见表7.2-245。

表7.2-245　TA21钛合金旋转弯曲疲劳极限

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	N/周	D/MPa
棒材	20	退火	L	20	1	-1	10^7	314
				20	2.33	-1	10^7	206
				300	1	-1	10^7	216
				400	1	-1	10^7	216

② 轴向加载疲劳极限见表7.2-246。

表7.2-246　TA21钛合金轴向加载疲劳极限

品种	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	N/周	σ_D/MPa
板材	1.0	退火	LT	20	1	-1	10^7	294

5）弹性性能　静态弹性模量见表7.2-247。

表7.2-247　TA21钛合金静态弹性模量

品种	d或δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	E/GPa
棒材	20	退火	L	250	84.3
				300	81.4
				400	77.5
				500	70.6
板材	2.0	退火	LT	20	112.8
				300	85.3

11.5　制造工艺和性能

1）热处理制度

① 普通退火　板材和板材零件：590～640℃，15～60 min，空冷；

棒材和锻件：690～740℃，45～100 min（$\delta \leqslant 50$ mm）或100～200 min（$\delta = 51 \sim 100$ mm），空冷。

② 真空退火　600～700℃，0.5～2 h，炉冷至200℃以下允许出炉空冷。炉内绝对压强应不大于6.65×10^{-2} Pa。

③ 去应力退火　去除零件冲压成形、焊接和机械加工时形成的内应力退火：480～520℃，0.5～2 h，空冷。去应力退火可以在真空炉或空气炉中进行。

2）热变形工艺和性能

① 坯料锻造工艺参数见表7.2-248。

表7.2-248　TA21钛合金坯料锻造工艺参数

工艺参数	铸锭开坯/℃	预变形坯料锻造			
		各方向锻造	锻至250～101 mm	锻至≤100 mm	最终锻造和荒坯成形
最高始锻温度/℃	950～1 050	1 000	1 000	980	880～950
最低终锻温度/℃	750	850	850	850	750
一火变形量/%	30～50	40～70	40～70	40～70	40～70

② 模锻工艺参数见表7.2-249。

3）冲压成形工艺和性能

① 板材冲压成形性能见表7.2-250。

表7.2-249　TA21钛合金模锻工艺参数

模锻设备	加热温度/℃		终止变形温度/℃≥	一火变形量/%
	最佳的	不高于		
锻锤	850～880	950	700	40～70
压力机	850～880	890	700	40～70

表7.2-250　TA21钛合金板材冲压成形性能

δ/mm	<1.0	1.0～3.0	1.6～3.0	>3.0
最小弯曲半径				
室温	(1.5～2.0)δ	(1.8～2.5)δ	—	(2.5～3.5)δ
热态	(1.0～1.2)δ	(1.2～1.5)δ	—	(1.2～1.5)δ
极限拉深系数				
室温	1.55～1.85	1.85～2.0	—	1.50～1.65
热态	1.7～1.9	>2.0	—	>2.0
极限翻边系数	(δ=0.3～0.7)	(δ=0.8～1.5)		
室温	1.40～1.65	1.70～1.75	1.5～1.6	1.5
热态	1.60～1.75	1.8	1.6～1.8	1.6
极限压窝系数	(δ=0.3～0.7)	(δ=0.8～1.5)		
室温	12～15	18～20	15～18	—
热态	15～20	20～25	22～25	—

② 板材冲压成形温度制度　一般零件在冷态下成形。当成形较复杂零件时，应采用中间退火，退火温度为650～700℃。复杂形状的零件应在热态下成形，冲压前毛坯加热温度范围550～700℃。毛坯加热在电炉或热模具中进行，也可采用能将加热温度控制在规定范围的辐射或感应加热方法。加热时间取决于板材厚度，为2～10 min。

4）管材成形工艺和性能

① 扩口试验　利用锥度为74°的心轴进行扩口试验时，管材外径扩大到30%应无裂纹产生。

② 压扁试验　进行压扁试验时，压板之间的距离H应达到以下规定的数值：

a）$D/S \leqslant 15$时，$H=(a+1)S/(a+S/D)$

式中，S为管材名义壁厚，mm）；D为管材名义外径，mm；a为系数，$a=0.033+0.001/(S/D)$。

b）D/S为>15～20时，$H=0.5D$。

c）D/S为>20～30时，$H=0.4D$。

d）D/S为>30时，$H=0.3D$。

③ 弯曲试验　管材在三倍外径的心轴上进行弯曲试验时，弯曲角达到180°应无裂纹产生。

5）焊接工艺和性能

① 焊接接头的力学性能见表7.2-251。

表7.2-251　TA21钛合金焊接接头的力学性能

焊接材料	焊接方法	填充材料	焊后热处理	θ/℃	σ_b/MPa	σ_{100}/MPa	$\sigma_{-1(1\times10^7)}$/MPa	$\alpha(D=2\delta)$/(°)
TA21+TA21	自动氩弧焊	无填料	未经热处理	20	490～637	—	216	100～130
				300	294～363	363	186	—
				400	245～294	—	—	—

② 管材焊接接头的力学性能见表7.2-252。

③ 管材手工对接焊典型规范见表7.2-253。

表 7.2-252 TA21 钛合金管材焊接接头的力学性能

焊接材料	焊接方法	填充材料	焊后热处理	θ/℃	σ_b/MPa		接头强度系数/%	δ/%	
					焊接接头	基体		焊接接头	基体
管材 ϕ27 mm×1.0 mm	真空充氩手工氩弧焊	TA0-1 焊丝	未经热处理	20	554	588	94	—	23
				150	427	432	98	50	29
				250	364	360	101	40	27
				350	327	322	101	33	19

表 7.2-253 TA21 钛合金管材手工对接焊典型规范

材料厚度/mm	焊接电流/A	焊丝直径/mm	钨极直径/mm	焊接层数
0.5	10~15	1.2~1.6	1.5~2.0	1
0.8	15~25	1.6	2.0	1
1.0	35~40	1.6	2.0	1
1.5	45~50	1.6	2.0	1
2.0	60~90	1.6	2.0	1

11.6 选材及应用

在飞机和航空发动机结构中，TA21 钛合金主要用于制造形状复杂、强度要求不高的板材或管材冷成形并焊接的零部件。TA21 钛合金在 300℃下的长时间工作寿命可达 5 000 h。某型号战斗机上，所采用的 TA21 钛合金半成品主要是需要冷成形和焊接的管材，用于漏油和通风系统。航空发动机结构中，采用 TA21 钛合金板材制造受力不大的壳体。

12 TC1 钛合金

TC1 是低合金化的 Ti-Al-Mn 系近 α 型钛合金，含有 2% 的 α 稳定元素 Al，对 α 相起固溶强化的作用。还含有 1.5% 的共析型 β 稳定元素 Mn，起到强化 β 相并改善工艺塑性的功能。TC1 钛合金名义成分的铝当量为 3.0，钼当量为 2.5，其主要性能特点是比工业纯钛略高的使用强度并保持了很好的工艺塑性。该合金还具有良好的焊接性能和热稳定性，长时间工作温度 350℃。

TC1 钛合金最适合于制造形状复杂的板材冲压并焊接的零部件，在航空航天工业和民用行业中获得了广泛应用。该合金只在退火状态下使用，不能采用固溶时效处理进行强化，其主要半成品是板材、棒材、管材、锻件、型材和丝材等。

1）材料牌号 TC1。

2）相近牌号 OT4-1（俄罗斯）。

12.1 化学成分

GB/T 3620.1—1994《钛及钛合金牌号和化学成分》规定的化学成分见表 7.2-254。

表 7.2-254 TC1 钛合金化学成分（质量分数） %

合金元素			杂质≤						
Al	Mn	Ti	Fe	C	N	H	O	其他元素	
								单个	总和
1.0~2.5	0.7~2.0	余量	0.30	0.10	0.05	0.012	0.15	0.10	0.40

12.2 物理及化学性能

1）密度 ρ = 4.55 g/cm³。

2）熔化温度约 1 630℃。

3）热导率见表 7.2-255。

表 7.2-255 TC1 钛合金热导率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
$\lambda/W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	10.2	10.5	11.3	12.2	13.4	14.7	16.3

4）比热容见表 7.2-256。

表 7.2-256 TC1 钛合金比热容

θ/℃	100	200	300	400	500	600
$c/J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$	503	566	628	670	755	838

5）线胀系数见表 7.2-257。

表 7.2-257 TC1 钛合金线胀系数

θ/℃	20~100	20~200	20~300	20~400	20~500	20~600
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	8.0	8.3	8.5	8.8	8.9	9.1

6）电阻率见表 7.2-258。

表 7.2-258 TC1 钛合金电阻率

θ/℃	20	100	200	300	400	500
$\rho/\mu\Omega\cdot m$	1.01	1.21	1.32	1.44	1.53	1.60

7）磁性能 无磁性。

8）抗氧化性能 与工业纯钛相近。

9）耐腐蚀性能 与工业纯钛相近。

12.3 相变及显微组织

1）相变温度 α+β↔β 相的转变温度为 920℃±20℃。

2）显微组织 合金在平衡状态下由 α 相和大约 2%的少量 β 相组成。当合金加热至 α+β 相区的下部并快速冷却时，得到 α 相和保留 β 相。从 α+β 区上部（例如 910℃）快速冷却时，得到 α' 马氏体相和少量 α 相。从 β 相区快速冷却时，不能将 β 相固定下来，而是 100%的 α' 马氏体相。

3）再结晶温度 开始：720℃；结束：840℃。

12.4 力学性能

1）技术标准规定的性能见表 7.2-259。

2）室温及各种温度下的力学性能

① 硬度 退火状态的室温硬度 210~250 HBS。

② 拉伸性能 各种温度下的拉伸性能见表 7.2-260。

不同温度真空退火后的拉伸性能见表 7.2-261。

不同温度空气退火后的拉伸性能见表 7.2-262。

③ 冲击性能 室温冲击韧度见表 7.2-263。

④ 弯曲性能 室温弯曲角见表 7.2-264。

⑤ 热稳定性 试样热暴露后的室温力学性能见表 7.2-265。

表 7.2-259　技术标准规定的 TC1 钛合金性能

技术标准	品种	状态	δ 或 d/mm	取样方向	室温 σ_b/MPa	室温 $\sigma_{p0.2}$/MPa	室温 δ_5/%	室温 φ/%	室温 α/(°)	350℃ σ_b/MPa	350℃ σ_{100}/MPa	400℃ σ_b/MPa	400℃ σ_{100}/MPa
						不小于							
GB/T 3621—1994	板材	退火	0.5 ~ 1.0	LT	590 ~ 735	—	25	—	100	340	320	310	295
			1.1 ~ 2.0		590 ~ 735	—	25	—	70	340	320	310	295
			2.1 ~ 5.0		590 ~ 735	—	20	—	60	340	320	310	295
			5.1 ~ 10.0		590 ~ 735	—	20	—	—	340	320	310	295
GJB 2505—1995	板材（带材）	退火	0.5 ~ 1.0	LT（L）	590 ~ 735	460	25	—	100	340	320	310	295
			1.1 ~ 2.0		590 ~ 735	460	25	—	70	340	320	310	295
			2.1 ~ 5.0		590 ~ 735	460	20	—	60	340	320	310	295
			5.1 ~ 10.0		590 ~ 735	460	20	—	—	340	320	310	295
GB/T 3623—1996	丝材①	退火	0.1 ~ 70	L	实测	—	实测	—	—	—	—	—	—
GB/T 2965—1996	棒材	退火	8 ~ 90	L	585	460	15	30	—	345	325	—	—
GJB 2218—1994	棒材	退火	21 ~ 100	L	585	—	15	30	—	—	—	—	—

① 焊丝不检验力学性能。

表 7.2-260　TC1 钛合金各种温度下的拉伸性能

品种	δ/mm	状态	θ/℃	σ_b/MPa L	σ_b/MPa LT	δ_5/% L	δ_5/% LT	品种	δ/mm	状态	θ/℃	σ_b/MPa L	σ_b/MPa LT	δ_5/% L	δ_5/% LT
板材	1.5	退火	20	652	647	30.5	32.0	板材	1.5	退火	500	348	333	42.0	45.5
			100	569	549	31.0	33.5				600	181	216	133.5	101.0
			200	505	476	31.5	31.5				700	83	72	195.6	131.0
			300	456	431	23.5	24.5				800	29	28	213.0	206.5
			400	431	412	23.0	26.0				—	—	—	—	—

表 7.2-261　TC1 钛合金不同温度真空退火后的拉伸性能

品种	δ/mm	状态	取样方向	退火温度/℃	20℃ σ_b/MPa	20℃ δ_5/%	400℃ σ_b/MPa	400℃ δ_5/%	品种	δ/mm	状态	取样方向	退火温度/℃	20℃ σ_b/MPa	20℃ δ_5/%	400℃ σ_b/MPa	400℃ δ_5/%
板材	0.8	真空退火（1 h）	LT	未退火	942	13.1	—	—	板材	0.8	真空退火（1 h）	LT	650	657	32.3	401	21.7
				300	920	14.4	—	—					700	648	32.9	385	22.3
				500	833	21.4	—	—					750	614	35.3	384	24.5
				550	798	22.2	—	—					800	629	33.3	380	22.3
				600	726	26.8	—	—					850	611	34.1	—	—

表 7.2-262　TC1 钛合金不同温度空气退火后的拉伸性能

品种	δ/mm	状态	取样方向	退火温度/℃	20℃ σ_b/MPa	20℃ δ_5/%	400℃ σ_b/MPa	400℃ δ_5/%	品种	δ/mm	状态	取样方向	退火温度/℃	20℃ σ_b/MPa	20℃ δ_5/%	400℃ σ_b/MPa	400℃ δ_5/%
板材	0.8	空气退火（20 min）	LT	未退火	942	13.1	—	—	板材	0.8	空气退火（20 min）	LT	650	757	30.2	452	21.3
				300	957	13.8	—	—					700	686	31.9	421	22.0
				500	907	20.3	—	—					750	672	31.5	428	17.6
				550	877	19.7	—	—					800	651	32.4	428	19.0
				600	827	23.0	—	—					850	680	28.6	—	—

表 7.2-263　TC1 钛合金室温冲击韧度

品种	状态	d/mm	取样方向	a_{KU}/kJ·m^{-2}
棒材	退火	30	L	541
		70		513
		90		486

表 7.2-264　TC1 钛合金室温弯曲角

品种	δ/mm	状态	取样方向	$\alpha(D=3\delta)$/(°)
板材	0.8	退火	L	108
			45°	123
			LT	129
	1.5	退火	L	121
			LT	132

表 7.2-265 TC1 钛合金试样热暴露后的室温力学性能

品种	δ/mm	状态	取样方向	热暴露条件 θ/℃	t/h	σ_b/MPa	δ_{10}/%	α/(°)
板材	2.0	退火	LT	未暴露		706	17.0	85
				200	3 000	716	16.5	75
					5 000	726	14.5	81
					10 000	726	15.0	70
					20 000	726	16.0	82
					30 000	726	15.0	99
				300	3 000	726	18.0	74
					5 000	735	16.0	77
					10 000	745	16.0	72
					20 000	745	16.0	81
					30 000	745	17.0	81

3）持久和蠕变性能

① 高温持久性能见表 7.2-266。

表 7.2-266 TC1 钛合金高温持久性能

品种	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_{100}/MPa	σ_{1000}/MPa	σ_{3000}/MPa	σ_{5000}/MPa
板材	1.0	退火	LT	300	431	422	422	422
				350	333	314	—	—
				400	284	265	—	—

② 高温蠕变性能见表 7.2-267。

表 7.2-267 TC1 钛合金高温蠕变性能

品种	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	$\sigma_{0.2/100}$/MPa	$\sigma_{0.2/2000}$/MPa
板材	1.0	退火	LT	300	284	245
				350	255	216
				400	186	157

4）疲劳性能

① 旋转弯曲疲劳极限见表 7.2-268。

表 7.2-268 TC1 钛合金旋转弯曲疲劳极限

品种	δ或d/mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	N/周	σ_D/MPa
棒材	24	退火	L	20	1	-1	10^7	441
					2.33	-1	10^7	343
				400	1	-1	10^7	275
					2.33	-1	10^7	127

② 轴向加载疲劳极限见表 7.2-269

表 7.2-269 TC1 钛合金轴向加载疲劳极限

品种规格	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	f/Hz	N/周	σ_D/MPa
板材	1.5	退火	L	350	1	0.1	100	10^7	363
			LT	350	1	0.1	100	10^7	363

5）弹性性能

① 室温动态弹性模量 E_D = 118 GPa。静态弹性模量见表 7.2-270。

表 7.2-270 TC1 钛合金静态弹性模量

品种	板材					
δ/mm	0.8					
状态	退火					
取样方向	LT					
θ/℃	20	100	200	300	400	500
E/GPa	127	123	116	110	104	99

② 切变模量见表 7.2-271。

表 7.2-271 TC1 钛合金切变模量

品种	板材					
δ/mm	0.8					
状态	退火					
取样方向	LT					
θ/℃	20	100	200	300	400	500
G/GPa	44	42	39	36	34	31

12.5 制造工艺和性能

1）热处理工艺和性能

① 普通退火　板材和板材零件：580～750℃，0.5～2 h，空冷；棒材和锻件：700～850℃，1～2 h，空冷。

② 真空退火　600～700℃，0.5～2 h，炉冷至 200℃以下允许出炉空冷。炉内绝对压强应不大于 6.65×10^{-2} Pa。

③ 去应力退火　去除零件冲压成形、焊接和机械加工时形成的内应力退火：520～560℃，0.5～2 h，空冷。去应力退火可以在空气炉或真空炉中进行。

2）热变形工艺和性能

① 不同温度下的变形抗力见表 7.2-272。

表 7.2-272 TC1 钛合金不同温度下的变形抗力

变形温度/℃	以下变形速率（s^{-1}）的最大变形抗力 10^{-2}	1	10	10^2
700	123	277	301	308
800	55	114	143	164
900	23	41	65	76
1 000	16	26	35	46
1 100	12	21	27	40

② 热变形工艺规范见表 7.2-273。

表 7.2-273 TC1 钛合金热变形工艺规范

锻造类型		加热温度/℃	终锻温度/℃	每火变形量/%
铸锭开坯		1 000～1 150	≥850	30～60
坯料锻造	≤100 mm	900～980	≥850	40～70
	>100 mm	900～1 000	≥850	40～70
压力机模锻		880～910	≥750	40～70
锻锤模锻		900～950	≥800	40～70

3）冲压成形工艺和性能

① 板材冲压成形性能见表 7.2-274。

表 7.2-274 TC1 钛合金板材冲压成形性能

δ/mm		< 1.0	1.0 ~ 3.0	1.6 ~ 3.0	> 3.0
最小弯曲半径	常温	(1.8 ~ 2.2) δ	(2.0 ~ 2.5) δ	—	(2.5 ~ 3.5) δ
	热态①	(1.3 ~ 1.5) δ	(1.4 ~ 1.8) δ	—	(1.5 ~ 2.0) δ
极限拉深系数	常温	1.55 ~ 1.80	1.80 ~ 1.85	—	1.45 ~ 1.60
	热态①	1.7 ~ 1.9	> 2.0	—	> 2.0
极限翻边系数	常温	1.35 ~ 1.50 (δ = 0.3 ~ 0.7)	1.6 ~ 1.7 (δ = 0.8 ~ 1.5)	1.45 ~ 1.55	1.4
极限压窝系数	常温	12 ~ 15	18 ~ 20	15 ~ 18	—
	热态①	15 ~ 20 (δ = 0.3 ~ 0.7)	20 ~ 25 (δ = 0.8 ~ 1.5)	22 ~ 25	—

① 加热温度为 550 ~ 700℃。

② 板材杯突成形性能见表 7.2-275。

表 7.2-275 TC1 钛合金板材杯突成形性能

δ/mm	冲头直径 d/mm	杯突深度/mm
0.8	3	0.60
	8	1.15
	14	3.20
	20	6.13

③ 板材冲压成形温度制度 一般零件在常温下成形。当成形较复杂零件时，应采用中间退火，退火温度为 650 ~ 700℃。复杂形状的零件应在热态下成形，冲压前毛坯加热温度范围为 550 ~ 700℃。毛坯加热在电炉或热模具中进行，也可采用能将加热温度控制在规定范围的辐射或感应加热方法。加热时间取决于板材厚度，为 2 ~ 10 min。

4）焊接工艺和性能

① 手工氩弧焊对接接头的力学性能见表 7.2-276。

② 自动钨极氩弧焊对接接头的力学性能见表 7.2-277。

表 7.2-276 TC1 钛合金手工氩弧焊对接接头的力学性能

焊接材料	δ/mm	焊前状态	焊后处理	焊丝牌号	θ/℃	σ_b/MPa	η/%	σ_{100}/MPa
板材	0.6	退火，酸洗	未处理	TA3	20	738	100	—
	0.8					746	100	—
	1.0					770	100	—
	0.8	退火，酸洗	未处理	TA3	400	398	98	275

表 7.2-277 TC1 钛合金自动钨极氩弧焊对接接头的力学性能

焊接材料	材料牌号	δ/mm	焊前状态	焊后处理	焊丝牌号	θ/℃	σ_b/MPa	η/%	α/(°)
板材	TC1 + TC1	0.6	退火，酸洗	未处理	TA3	20	668	100	—
					TC1		688	100	75
					不加焊丝		655	100	—
		0.8	退火，酸洗	未处理	TA3	20	679	95	—
					TC1		679	95	51
					不加焊丝		689	95	—
		1.0	退火，酸洗	未处理	TA3	20	729	100	—
					TC1		729	100	—
					不加焊丝		744	100	61
		1.5	退火，酸洗	未处理	TA3	20	671	100	81
					TC1		654	100	60
					不加焊丝		673	100	84
		1.5	退火，酸洗	未处理	TA3	300	402	—	—
						400	387	—	—
						500	330	—	—
	TC1 + TA7	1.5	退火，酸洗	未处理	TC1	20	678	—	—

③ 点焊接头的单点剪切和正拉强度见表 7.2-278。

④ 缝焊接头的力学性能见表 7.2-279。

⑤ 填充焊丝 当焊接厚度小于 3 mm 时，采用 TA0 焊丝；当焊接厚度为 3 ~ 7 mm 时，采用 TC1 焊丝；当焊接厚度大于 7 mm 时，采用 TC1 或 TC2 焊丝。

12.6 选材及应用

在飞机和航空发动机结构中，TC1 合金主要用于制造形状较复杂、强度要求不高的板材冲压成形并焊接的零部件。350℃下的工作寿命为 2 000 h，300℃下的工作寿命可达

30 000 h。某型号战斗机上TC1合金板材的单机用量达到230 kg，主要用于制造后机身的机尾整流罩（图7.2-39）、蒙皮和外侧壁板等。航空发动机中，TC1合金主要用于制造各种壳体和隔热罩。

表7.2-278 TC1钛合金点焊接头的单点剪切和正拉强度

焊接材料	δ/mm	焊前状态	焊后处理	核心直径/mm	θ/℃	P_t/N·点$^{-1}$	P_b/N·点$^{-1}$
板材	0.6+0.6	真空退火	未处理	3.4	20	5 305	1 353
	0.6+1.0			4.0		5 698	1 814
	0.8+0.8			4.2		7 620	2 010
	0.8+0.8+0.8			6.5		8 208	—
	1.0+1.0			6.2		10 836	2 520
	1.5+1.5			7.3		16 240	3 883
	0.6+0.6	真空退火	未处理	3.4	350	3 403	—
	0.8+0.8			4.2		5 041	—
	0.6+0.6	真空退火	未处理	3.4	400	3 423	—
	0.8+0.8			4.2		4 335	—

表7.2-279 TC1钛合金缝焊接头的力学性能

焊接材料	δ/mm	焊前状态	焊后处理	θ/℃	σ_b/MPa	η/%	σ_{100}/MPa
板材	0.6	真空退火	未处理	20	659	100	—
	0.8				668	95	—
	1.0				626	94	—
	1.5				640	98	—
	0.8	真空退火	未处理	350	398	—	—
	0.8	真空退火	未处理	400	389	—	275

TC1钛合金在民用行业中也获得广泛应用，例如汽车工业中的消音器、车架和吊挂件等；以及食品工业中压团鱼类用的预压装置等。

TC1（OT4-1）钛合金是前苏联于20世纪50年代研制成功的。俄罗斯已于20世纪80年代研制成功OT4-1B（Ti-3Al-2.5V），以取代OT4-1钛合金。OT4-1B钛合金具有与OT4-1相似的低强度和高工艺塑性，其主要区别是用钒代替了熔炼时易挥发难控制的合金元素锰。该合金尚在推广阶段。

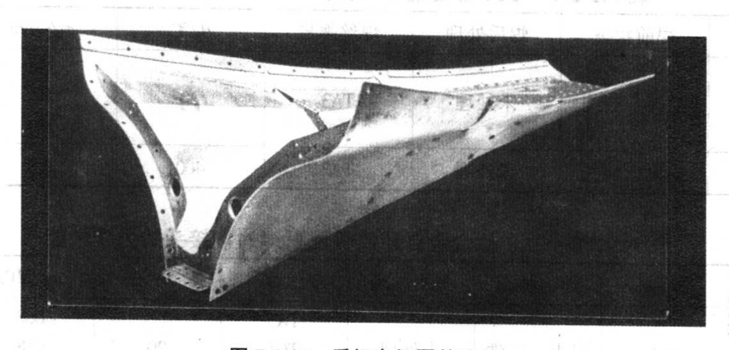


图7.2-39 后机身机尾整流罩

13 TC2钛合金

TC2合金的名义成分为Ti-4Al-1.5Mn，是一种700 MPa等级的中等强度和较好塑性的近α型钛合金，与TC1、TA21同属于Ti-Al-Mn系合金，不同的是含有较高的Al，因而有较高的强度和热强性，而塑性和工艺性稍次于TC1。合金在热态和有限冷态下有好的成形性能。在冲压复杂结构的零件时需要加热。合金可采用氩弧焊、接触焊（点焊、缝焊、对焊）和电子束焊。合金不能热处理强化，惟一的热处理方式是完全退火和不完全退火（即消除残余应力）。合金具有较高的热稳定性。制造的零件能够在350℃下工作，短时工作可达750℃。

TC2合金的半成品有板材、带材、管材、棒材和锻件，适合于制造如机翼、安定面、襟翼等受力的板材冲压件、焊接构件及各种导管。

1）材料牌号 TC2。

2）相近牌号 OT4（俄罗斯）。

13.1 化学成分

GB/T 3620.1—1994《钛及钛合金牌号和化学成分》和11-CL-047A规定的化学成分见表7.2-280。

表7.2-280 TC2钛合金化学成分（质量分数）%

合金元素			杂质，不大于						
Al	Mn	Ti	Fe	C	N	H	O	其他元素①	
								单个	总和
3.5~5.0	0.8~2.0	余量	0.30	0.10	0.05	0.012	0.15	0.10	0.40

① 产品出厂时供方可不检验其他元素，用户要求并在合同中注明时可予以检验。

13.2 物理及化学性能

1）密度 $\rho=4.55\ g/cm^3$。

2）热导率见表7.2-281。

3）比热容见表7.2-282。

表7.2-281 TC2钛合金热导率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
λ/W·m^{-1}·K^{-1}	10.2	10.4	11.3	12.1	13.4	14.6	16.6

表 7.2-282　TC2 钛合金比热容

θ/℃	100	200	300	400	500	600
c/J·kg^{-1}·K^{-1}	503	566	628	670	755	838

4）线胀系数见表 7.2-283。

表 7.2-283　TC2 钛合金线胀系数

θ/℃	20～100	20～200	20～300	20～400	20～500	20～600
α/10^{-6}K^{-1}	8.0	8.3	8.5	8.8	8.9	9.1
θ/℃	100～200	200～300	300～400	400～500	500～600	
α/10^{-6}K^{-1}	8.6	9.1	9.6	9.7	9.8	

5）电阻率　室温电阻率 $\rho=1.38\ \mu\Omega\cdot m$；100℃电阻率 $\rho=1.46\ \mu\Omega\cdot m$。

6）磁性能　无磁性。

7）化学性能

① 抗氧化性能　与工业纯钛相近。

② 耐腐蚀性能　与工业纯钛相近。

13.3　相变及显微组织

1）相变温度　α+β↔β 相转变温度为 940℃±20℃。

2）显微组织　合金在室温平衡状态下由α相和少量的β相组成，β相的含量一般为 2%～4%。当合金从β相区快速冷却时，得到过饱和的马氏体α′相；从α+β相区上部（例如 910℃）快速冷却时得到α′相和少量的初生α相；若从α+β相区下部快速冷却，则得到初生α相和保留的β相。

13.4　力学性能

1）技术标准规定的性能见表 7.2-284。

表 7.2-284　技术标准规定的 TC2 钛合金力学性能

技术标准	品种	状态	δ或 d/mm	取样方向	室温					350℃		400℃	
					σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	α/(°)	σ_b/MPa	σ_{100}/MPa	σ_b/MPa	σ_{100}/MPa
						≥							
GB/T 3621—1994	板材	退火	0.5～1.0 1.1～2.0 2.1～5.0 5.1～10.0	LT	≥685	—	25 15 12 12	—	80 60 50 —	420	390	390	360
GJB2505—1995	板材（带材）	退火	0.5～1.0 1.1～2.0 2.1～5.0 5.1～10.0	LT（L）	685～920	620	25 15 12 12	—	80 60 50 —	420	390	390	360
GB/T 2965—1996	棒材	退火	8～90	L	≥685	560	12	30	—	420	390	—	—
GJB 2218—1994	棒材	退火	21～100	L	≥685	—	12	30	—	420	390	—	—
XJ/BS 5160—1997 11-CL-047A	管材	退火（冷轧）	（22～62）×（1.5～4.0）	L	685～835	—	10①	—	—	—	—	—	—
		退火（热轧）	（48～68）×（6.0～10.0）	L	685～835	—	8	—	—	—	—	—	—

① 断后伸长率为 δ_{10}。

2）室温及各种温度下的力学性能

① 硬度　退火状态室温硬度 HB=207～285。

② 拉伸性能　棒材的室温拉伸性能见表 7.2-285。

表 7.2-285　TC2 钛合金棒材室温拉伸性能

品种	d/mm	状态	取样方向	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
棒材	25～70	退火	L	829	704	18.0	35.4

板材各种温度下的拉伸性能见表 7.2-286。

表 7.2-286　TC2 钛合金各种温度下板材的拉伸性能

品种	δ/mm	状态	θ/℃	σ_b	$\sigma_{p0.2}$	$\sigma_{p0.01}$	δ_5/%
				MPa			
板材	0.5～10	退火	20	784	686	471	28
			250	539	441	284	30
			300	510	431	275	29
			350	500	412	275	26
			400	490	382	235	26
			450	471	—	—	25
			500	431	304	206	29
板材	2.0	退火	−70	942	—	—	21.7
			20	748	—	—	24.6
			400	531	—	—	27.4
			500	469	—	—	40.4

管材不同温度下的拉伸性能见表 7.2-287。

高温秒计强度见图 7.2-40。

表 7.2-287　TC2 钛合金管材不同温度下的拉伸性能

规格/mm	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_{10}/%	ψ/%
Φ22×1.5	20	735	563	17	
	150	590	472	13	
	250	557	415	12	
	350	523	407	10	

续表 7.2-287

规格/mm	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_{10}/%	ψ/%
Φ40×1.5	20	823	593	16	
	150	665	492	14	
	250	620	427	13	
	350	573	393	13	
Φ48×6.0	20	717	633	15	44
	150	590	493	15	51
	250	533	425	15	55
	350	507	382	15	55

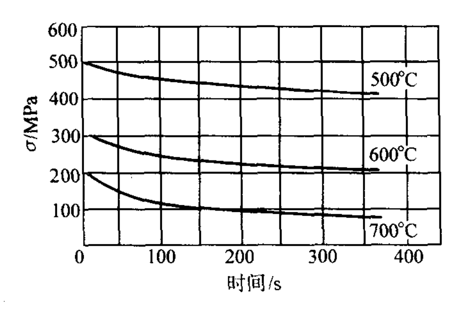


图 7.2-40　TC2 钛合金高温秒计强度

板材的拉伸应力-应变曲线见图 7.2-41。

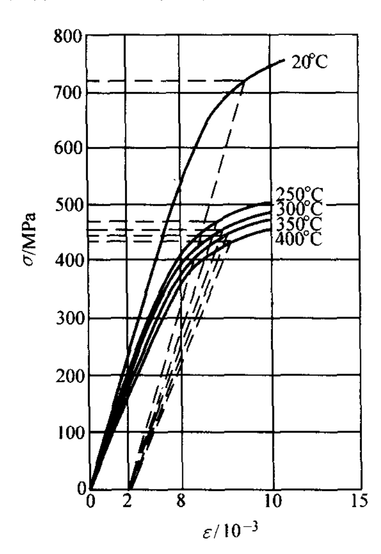


图 7.2-41　TC2 合金板材退火状态的拉伸应力-应变曲线

③ 冲击性能　室温冲击韧度见表 7.2-288。

表 7.2-288　TC2 钛合金冲击韧度

品种	d/mm	状态	取样方向	a_{KU}/kJ·m^{-2}
棒材	20	退火	L	588

④ 弯曲性能　室温弯曲角见表 7.2-289。

表 7.2-289　TC2 钛合金弯曲角

品种	δ/mm	状态	取样方向	α(D=3δ)/(°)
板材	0.6	退火	LT	91
	0.8			84
	1.5			63

⑤ 承载性能见表 7.2-290。

表 7.2-290　TC2 钛合金承载性能

品种	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	e/D	σ_{bru}/MPa	σ_{bry}/MPa
板材	1.2	退火	LT	20	1.5	1 307	1 060
					2.0	1 375	1 219

⑥ 应力集中见表 7.2-291。

表 7.2-291　TC2 钛合金应力集中敏感性

品种	状态	θ/℃	σ_{bH}/MPa	σ_{bH}/σ_b
棒材	退火	20	1 224	1.60
		350	808	1.55
		400	778	1.50
		450	756	1.50

⑦ 热稳定性　试样热暴露后的室温拉伸性能见表 7.2-292。

表 7.2-292　TC2 钛合金热稳定性

品种	δ/mm	状态	热暴露条件 θ/℃	热暴露条件 t/h	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_{10}/%	α/(°)
板材	2.0	退火	未暴露		784	716	13	72
			200	3 000	814	—	13	69
				5 000	824	735	14	62
				10 000	843	735	14	62
				20 000	834	726	11	64
				30 000	834	—	12	74
			300	3 000	853	755	13	69
				5 000	824	735	13	65
				10 000	863	775	12.5	65
				20 000	863	755	12	70
				30 000	863	—	12	69

3）持久和蠕变性能

① 高温持久性能见表 7.2-293。

表 7.2-293　TC2 钛合金高温持久性能

品种	δ或d/mm	状态	θ/℃	σ_{100}/MPa	σ_{1000}/MPa	σ_{2000}/MPa	σ_{5000}/MPa	σ_{10000}/MPa	σ_{20000}/MPa
板材	—	退火	250	—	510	510	510	510	—
			300	—	741	471	471	471	471
			350	—	451	451	—	—	—
			400	—	422	—	—	—	—
	2.0	退火	400	530	—	—	—	—	—
棒材	—	退火	300	549	—	—	—	—	—
			550	98	—	—	—	—	—

② 高温蠕变性能见表 7.2-294。

表 7.2-294　TC2 钛合金蠕变性能

品种	状态	θ/℃	$\sigma_{0.2/100}$	$\sigma_{0.2/500}$	$\sigma_{0.2/1000}$	$\sigma_{0.2/2000}$	$\sigma_{0.2/5000}$
			MPa				
板材	退火	250	461	—	422	422	—
		300	441	363	343	275	225
		350	324	304	265	—	—
		400	196	—	—	—	—
		450	49	—	—	—	—

4）疲劳性能

反复弯曲疲劳极限见表 7.2-295。

表 7.2-295　TC2 钛合金弯曲疲劳性能

品种	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	N/周	σ_D/MPa
板材	退火	T	20	1	-1	10^7	431
			350				333
			400				265

旋转弯曲疲劳极限见表 7.2-296。

表 7.2-296　TC2 钛合金旋转弯曲疲劳极限

品种	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	N/周	σ_D/MPa
棒材	退火	L	20	1	-1	107	402
				2.2			353
			550	1	-1	107	245
				2.2			167

轴向加载疲劳极限见表 7.2-297。

表 7.2-297　TC2 钛合金轴向加载疲劳极限

品种	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	N/周	σ_D/MPa
板材	2.0	退火	T	20	3	0.1	107	250

板材缺口试样室温轴向加载疲劳 S-N 曲线见图 7.2-42。

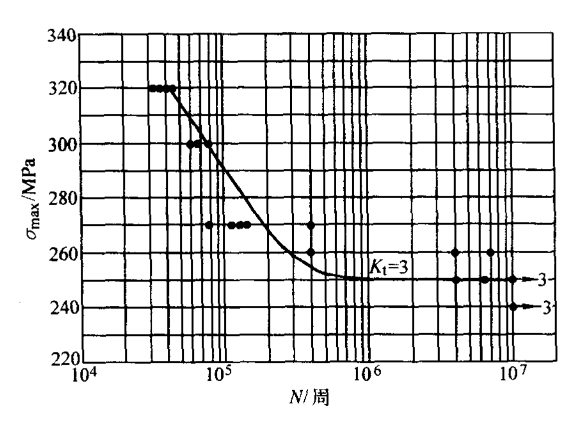


图 7.2-42　TC2 钛合金板材缺口试样室温轴向加载疲劳 S-N 曲线

材料品种：板材　　加载方式：轴向

材料规格：δ2.0 mm　　应力比：0.1

热处理状态：700℃，30 min，空冷　　试验频率：120 Hz

材料强度：σ_b = 748 MPa，$\sigma_{p0.2}$ = 720 MPa　　试验环境：20℃，空气

取样方向：LT　　试样数：29

5）弹性性能　弹性模量见表 7.2-298。

表 7.2-298　TC2 钛合金弹性模量

品种	δ 或 d /mm	状态	E/GPa						
			20℃	250℃	300℃	350℃	400℃	500℃	550℃
板材	0.5 ~ 10.0	退火	107.9	91.2	84.3	80.4	71.6	55.9	—
棒材	—	退火	117.7	107.9	—	—	—	—	71.6

13.5　制造工艺和性能

1）热处理工艺和性能

① 退火　板材和板材零件：660 ~ 710℃，15 ~ 60 min，空冷或更慢冷；棒材、锻件和管材：740 ~ 790℃，1 ~ 2 h，空冷。

② 去应力退火　545 ~ 585℃，0.5 ~ 6 h，空冷或炉冷。

2）成形工艺和性能　该合金热状态下工艺塑性良好。一般推荐采用热冲压，若零件在冷态下成形，应采用中间退火，退火温度为 650 ~ 680℃。当冲压复杂零件时，应在加热状态下成形，毛坯可采用电阻加热或氧-乙炔喷灯加热，加热温度一般为 550 ~ 600℃。

① 退火板材的成形性能见表 7.2-299。

表 7.2-299　TC2 钛合金退火板材成形性能

成形性能		冷态	热态
最小弯曲半径	最低值	(2.5 ~ 3.0) δ	(1.5 ~ 2.0) δ
	工作值	(4.0 ~ 5.0) δ	(2.0 ~ 2.5) δ
极限拉深系数	极限值	1.55 ~ 1.75	> 2.2
	工作值	1.40 ~ 1.60	1.8 ~ 2.0
极限翻边系数	极限值	1.50 ~ 1.70	1.75 ~ 1.90
	工作值	1.35 ~ 1.60	1.60 ~ 1.75
极限压窝系数	平面压出	0.12 ~ 0.20	0.20 ~ 0.24
	球面压出	0.25 ~ 0.40	0.28 ~ 0.32

② 变形抗力见表 7.2-300。

表 7.2-300　TC2 钛合金变形抗力

变形温度 /℃	以下变形速率（s^{-1}）的最大变形抗力/MPa			
	10^{-2}	1	10	10^2
700	142	314	337	336
800	92	178	212	238
900	58	97	136	161
1 000	11	20	36	55
1 100	09	15	25	38

③ 热变形规范见表 7.2-301。

表 7.2-301　TC2 钛合金热变形规范

热变形类型	加热温度/℃	终锻温度/℃	一火变形量/%
铸锭开坯	1 080	≥850	30 ~ 50
坯料锻造	980	≥800	40 ~ 70
压力机模锻	900 ~ 930	≥750	40 ~ 70
锻锤模锻	910 ~ 950	≥800	40 ~ 70

3）焊接工艺和性能　TC2 合金系近α型钛合金，退火状态含有少量β相，适宜于氩弧焊、点焊和缝焊。焊接接头不易产生裂纹、缩孔等缺陷。熔焊焊接接头的强度和塑性接近于基体金属的强度和塑性。焊接后，最好进行去应力退火，以消除焊接内应力。

① 手工钨极氩弧焊焊接工艺参数见表7.2-302。

表7.2-302 TC2钛合金手工钨极氩弧焊焊接工艺参数

焊接材料	δ/mm	坡口型式	填充材料	焊接层数	焊丝直径/mm	I/A	v/mm·s^{-1}
板材	2.5	$\alpha=45°$	TA0-1	1	3.0	70~80	1.7~2.3

② 钨极氩弧焊接头轴向加载疲劳极限见表7.2-303。

③ 钨极氩弧焊接头力学性能见表7.2-304。

表7.2-303 TC2钛合金钨极氩弧焊接头轴向加载疲劳极限

焊接材料	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	N/周	σ_D/MPa
板材	2.0	基体退火	LT	20	3	0.1	10^7	250
		焊接+600℃，1 h，炉冷	LT	20	3	0.1	10^7	205

表7.2-304 TC2钛合金钨极氩弧焊接头力学性能

焊接材料	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_b/MPa	δ_5/%	断口位置	$\alpha(D=2\delta)$/(°)	σ_{100}/MPa
板材	2.0	基体退火	LT	-70	942	21.7	—	—	—
				20	748	24.6	—	50.8	—
				400	531	27.4	—	—	530
		焊接+600℃，1 h，炉冷	LT	-70	1 005	15.8	基体	—	—
				20	777	16.9	基体	47.3	—
				400	483	10.0	焊缝	—	530
			45°①	20	822	14.5	基体	—	—

① 拉伸方向与轧制方向垂直，与焊缝成45°。

13.6 选材及应用

在Ti-Al-Mn系的三个合金中TC2、TC1、TA21分别为700 MPa、600 MPa和500 MPa三个强度等级的高塑性近α合金，主要用作板材结构件、焊接件和各种导管。使用温度均为350℃。TC2钛合金在350℃下工作可达2 000 h，在300℃下工作可达30 000 h，短时工作可达750℃。

由于TC2（俄OT4）含有1.5%的Mn，而Mn在熔炼过程中容易挥发，所以给熔炼工艺带来了困难，合金应经过两次真空自耗电极电弧炉熔炼。一次熔炼在真空中进行，二次熔炼需在氩气保护中进行。俄罗斯在20世纪80年代研制成功了OT4B（Ti-5Al-2V）合金，它在力学性能和工艺方面与含Mn的合金无原则差别，用于取代OT4。表7.2-305为常用的高塑性低强度结构钛合金。

表7.2-305 常用高塑性低强度结构钛合金

牌号	相近中国牌号	名义成分	保证的室温强度等级/MPa	长期工作温度/℃	半成品
BT1-00 BT1-0	TA0 TA1、TA2	Ti Ti	300 400	300 300	板、管、棒、型材
OT4-0	TA21	Ti-1Al-1Mn	500	300	板、管、棒、型材
OT4-1 OT4-1B	TC1 TA18	Ti-2Al-1.5Mn Ti-3Al-2.5V	600 600	350 350	板、管、棒、型材
OT4 OT4B	TC2	Ti-4Al-1.5Mn Ti-5Al-2V	700 700	350 350	板、管、棒、型材

TC2钛合金管材在航空上应用时除了力学性能的要求之外，根据使用部位进行工艺试验：扩口试验、压扁试验、弯曲试验、液压试验和活动接头试验。并根据需要表面进行防护处理，如化学镀镍以提高其耐磨性；镀铜、镀银防止粘结，阳极化处理防止接触腐蚀等。

14 TA15（TA15-1、15-2）钛合金

TA15钛合金的名义成分为Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V。它是于1964年作为比TA7强度更高的板材钛合金研制成功。其主要的强化机制是通过α稳定元素Al的固溶强化。加入中性元素Zr和β稳定元素Mo和V，可以改善工艺性能。该合金的Al当量为6.58%，Mo当量为2.46%，属于高Al当量的近α型钛合金，所以它既具有α型钛合金良好的热强性和可焊性，并具有接近于α-β型钛合金的工艺塑性。与TA11（Ti-8Al-1Mo-1V）相比，TA15以2Zr取代TA11中的2Al，降低了Al当量，改善了热稳定性和热盐应力腐蚀倾向等使用性能。该合金不能进行热处理强化。在退火状态以α相固溶体为基体，含少量的β相（5%~7%）。TA15合金具有中等的室温和高温强度、良好的热稳定性和焊接性能。

TA15合金的半成品有薄板、厚板、轧棒、锻棒、模锻件、锻件、挤压型材、焊接环形件、整体环轧件和铸件等。

1）材料牌号 TA15、TA15-1、TA15-2、ZTA15。

TA15钛合金的铸造合金牌号为ZTA15，其焊丝的牌号为TA15-1和TA15-2。

2）相近牌号 BT20、BT20-1$_{CB}$、BT20-2$_{CB}$、BT20Л（俄罗斯）。

14.1 化学成分

Q/6S 1875—2002《11号工程用TA15钛合金板材技术条件》、Q/6S 1873—2002《11号工程用TA15钛合金棒材技术条件》、11-CL-059B—2001《航空用TA15钛合金锻坯技术条件》和Q/6S 1876—2002《钛及钛合金焊丝》规定的化学成分见表7.2-306。

表 7.2-306 TA15 钛合金化学成分（质量分数） %

牌号	合金元素					杂质≤						
	Al	Mo	V	Zr	Ti	C	Fe	Si	O	N	H	其他杂质总量[①]
TA15	5.5～7.0	0.5～2.0	0.8～2.5	1.5～2.5	余量	0.10	0.25	0.15	0.15	0.05	0.015	0.30
TA15-1	2.0～3.0	0.5～2.0	0.8～2.5	1.5～2.5	余量	0.05	0.15	0.10	0.12	0.04	0.003	0.30
TA15-2	3.5～4.5	0.5～2.0	0.8～2.5	1.5～2.5	余量	0.05	0.15	0.10	0.12	0.04	0.003	0.30
ZTA15	5.5～6.8	0.5～2.0	0.8～2.5	1.5～2.5	余量	0.13	0.30	0.15	0.16	0.05	0.01	0.30

① 其他杂质，在正常情况下不作检验，但供方应保证。需方要求并在合同中注明时应予以检验，检验元素包括：Cu、Ni、B、Y，单个元素不大于0.1%，Y不大于0.005%。

14.2 物理及化学性能

1）密度 $\rho = 4.450\ g/cm^3$。

2）热导率见表7.2-307。

表 7.2-307 TA15 钛合金的热导率

θ/℃	100	200	300	400	500	600	700	800	900
$\lambda/W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	8.8	10.2	10.9	12.2	13.8	15.1	16.8	18.0	19.7

3）比热容见表7.2-308。

表 7.2-308 TA15 钛合金的比热容

θ/℃	100	200	300	400	500	600	700	800	900
$c/J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$	545	587	628	670	712	755	838	880	922

4）线胀系数见表7.2-309。

表 7.2-309 TA15 钛合金线胀系数

θ/℃	20～200	20～300	20～400	20～500	20～600	20～700	20～800
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	8.9	9.0	9.2	9.3	9.5	9.7	9.7
θ/℃	100～200	200～300	300～400	400～500	500～600	600～700	700～800
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	9.0	9.2	9.7	10.0	10.4	10.9	10.9

5）电阻率　室温电阻率 $\rho = 1.63\ \mu\Omega\cdot m$。

6）磁性能　无磁性。

7）抗氧化性能　参见TC4钛合金。

8）耐腐蚀性能　合金在大气条件下和海水中稳定。

① 接触腐蚀　电偶电流是评定不同金属接触产生电偶腐蚀敏感性的重要指标。通过对TA15钛合金与铝合金和结构钢、高强钢、铸钢（及其附加表面防护后）接触后形成的电偶电流的测定和大气暴露试验，评价其产生电偶腐蚀的敏感性，为结构设计提供参考依据。

测定TA15钛合金于不同防护处理后的钢接触腐蚀的电偶电流。电偶对的组合见表7.2-310。电偶电流测定的结果表明：当TA15钛合金与铝合金（LY6、LC4）、钢（30CrMnSiA、30CrMnSiNi2A和16CrNiSi）接触形成电偶时，必须对铝合金和钢进行防护后方可使用；对铝合金进行阳极氧化可以降低TA15钛合金与铝合金之间电偶腐蚀的敏感性，但要完全阻止电偶腐蚀的产生，必须配合涂漆工艺。对钢进行表面处理，并增加防护底漆也是防止钛合金与钢之间产生的电偶腐蚀的有效手段，但涂漆工艺质量对防护效果影响极大，必须严格把关。

表 7.2-310 测定的接触腐蚀性能电偶对

序号	电偶对	
1	TA15 钛合金	LY6 铝合金
2	TA15 钛合金	LY6 铝合金阳极化
3	TA15 钛合金	LY6 铝合金阳极化＋1号航空底漆
4	TA15 钛合金	LC4 铝合金
5	TA15 钛合金	LC4 铝合金阳极化
6	TA15 钛合金	LC4 铝合金阳极化＋1号航空底漆
7	TA15 钛合金	30CrMnSiA 钢
8	TA15 钛合金	30CrMnSiA 钢氯化铵镀镉＋磷化氧化
9	TA15 钛合金	30CrMnSiA 钢氯化铵镀镉＋磷化氧化＋1号航空底漆
10	TA15 钛合金	30CrMnSiNi2A 钢
11	TA15 钛合金	30CrMnSiNi2A 钢氯化铵镀镉＋磷化氧化
12	TA15 钛合金	30CrMnSiNi2A 钢氯化铵镀镉＋磷化氧化＋1号航空底漆

② 氢脆和应力腐蚀　通过对TA15钛合金及其焊接接头的氢脆和应力腐蚀试验研究，评估了该合金的抗应力腐蚀和抗氢脆的能力。研究结果表明：TA15钛合金具有较好的抗应力腐蚀性能；TA15钛合金应力腐蚀断口主要为穿晶解理断裂，部分有韧窝，并且有腐蚀产物；氢含量不高时，不同氢含量对TA15钛合金母材、潜弧焊焊接接头和电子束焊接接头的缺口强度影响不大。

③ 热盐应力腐蚀　通过对TA15钛合金抗热盐应力腐蚀开裂的能力的试验研究，给设计提供必要的应用依据。研究结果表明：在250～400℃之间，0.01 mg/cm^2 和0.05 mg/cm^2 的盐量对热盐应力腐蚀的影响区别不大；惰气熔融法测得试样的氢含量表明，热暴露时产生的氢是发生热盐应力腐蚀的重要因素；TA15钛合金具有良好的热稳定性；温度低于250℃时，TA15钛合金对热盐应力腐蚀不敏感，高于250℃时TA15钛合金有热盐应力腐蚀倾向，热盐应力腐蚀临界应力低于高温断裂强度，成为影响材料应用的限制因素。

14.3 相变及显微组织

1）相变温度　$\alpha+\beta \leftrightarrow \beta$ 转变温度为1 000℃±20℃。

2）再结晶温度　再结晶的开始温度为800℃，结束温度约为950℃。

3）显微组织　合金在退火状态下的相组成为α相固溶体和少量的β相（5%～7%），其半成品的显微组织评级一般采用近α型钛合金的图谱。锻件用TA15合金一般Al、

Mo、Zr、V 的含量取成分范围的中上限，K_{β} 系数接近 TC4，其显微组织与 TC4 类似，所以参考 TC4 的显微组织分类图谱进行组织评定也是合理的。

14.4 力学性能

1）技术标准规定的性能见表 7.2-311。

表 7.2-311 技术标准规定的 TA15 钛合金性能

技术标准	品种	状态	δ 或 d/mm	取样方向	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	α/(°)	a_{ku}/kJ·m^{-2}
							≥				
Q/6S 1875—2002	板材	退火	0.8～1.8	L，LT	室温	930～1 130	855①	12	—	30	—
			>1.8～4.0			930～1 130	855①	10	—	30	—
			>4.0～10.0			930～1 130	855①	8	—	30②	—
			>10.0～70			930～1 130	855	6	12	—	300
Q/6S 1873—2002	棒材和锻坯	退火	10～110	L④	室温	930～1 130	855	10	27	—	400③
			>110～150			930～1 130	855	9	24	—	350
			75～110	LT		930～1 130	855	8	22	—	350
			>110～200			930～1 130	855	8	20	—	350
			>200～300			930～1 130	815	8	20	—	300
			>200～300 棒材镦粗圆饼	C		930～1 130	855	9	25	—	400
11-CL-059B —2001	锻件	退火	—	L	室温	930～1 130	855	10	25	—	400
				LT		930～1 130	855	8	20	—	300
				ST⑤		930～1 130	855	7	16	—	300

技术标准	品种	状态	δ 或 d/mm	取样方向	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	持久性能	
								σ/MPa	τ/h
Q/6S 1875—2002	板材	退火	<30	L，LT	500	≥635	—	440	≥100
			≥30～70			≥570	—	440	≥100
Q/6S 1873—2002	棒材	退火	10～200	LT⑥	500	≥570	—	440	≥100
			>200～300			实测	—	440	≥100
11-CL-059B—2001	锻件	退火	—	L	500	≥635	实测	470	≥50
								440⑦	≥100

注：1. 棒材的室温断裂韧度报实测值，取样方向为 L-R 或 T-L 方向。
2. 规定锻件的室温硬度 HBS d=3.3～3.8 mm。
3. 锻件的室温断裂韧度报实测值，取样方向为 T-L 方向。

① $\delta \leqslant 10$ mm 的板材，纵向 $\sigma_{p0.2}$ 暂不作为报废依据。
② $\delta > 6.0$ mm 的板材，弯曲性能不检验。
③ $d \geqslant 16$ mm 的棒材，检测冲击韧性。
④ 合同中注明 d=75～150 mm 的棒材检验横向性能时，可不再检验纵向性能。
⑤ 锻件的短横向尺寸大于或等于 75 mm 时，应检验短横向性能。
⑥ 棒材尺寸不允许取横向试样时，检验纵向性能。
⑦ 重复试验或仲裁试验时，应按此应力进行检验。

2）室温及各种温度下的力学性能

① 硬度　室温硬度 HBS=255～341。

② 拉伸性能　不同厚度板材的室温拉伸性能见表 7.2-312。

表 7.2-312 TA15 钛合金不同板材的室温拉伸性能

品种	δ/mm	状态	取样方向	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
板材	6.0	热轧	L	1 150	995	9.5	—
			LT	1 185	1 115	9.5	—
		760℃，1 h，空冷	L	1 070	920	11.0	—
			LT	1 075	1 035	13.0	—

续表 7.2-312

品种	δ/mm	状态	取样方向	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
板材	6.0	800℃，1 h，空冷	L	1 040	900	12.0	—
			LT	1 050	1 000	13.0	—
		840℃，1 h，空冷	L	1 050	890	13.5	—
			LT	1 045	990	13.0	—
		880℃，1 h，空冷	L	1 025	875	11.0	—
			LT	1 040	980	12.5	—

续表 7.2-312

品种	δ/mm	状态	取样方向	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
板材	8.0	热轧	L	1 090	998	8.3	—
			LT	1 185	1 105	12.0	—
		760℃，1 h，空冷	L	1 010	905	12.5	—
			LT	1 065	1 015	13.5	—
		800℃，1 h，空冷	L	1 000	885	13.0	—
			LT	1 080	1 005	14.5	—
		840℃，1 h，空冷	L	1 010	878	13.0	—
			LT	1 065	985	13.0	—
		880℃，1 h，空冷	L	1 035	888	11.0	—
			LT	1 130	1 015	13.0	—
	15	热轧	L	1 010	898	13.5	37
			LT	1 060	988	13.5	51
		760℃，1 h，空冷	L	978	885	13.0	6.5
			LT	1 020	963	15.5	50
		800℃，1 h，空冷	L	1 005	888	13.0	33
			LT	1 055	978	13.5	48.5
		840℃，1 h，空冷	L	1 030	900	12.5	31
			LT	1 085	978	12.5	43.5
		880℃，1 h，空冷	L	1 010	895	14.0	36.5
			LT	1 065	970	14.0	46.5
	45	热轧	L	946	970	12.8	36
			LT	951	893	12.0	29
		700℃，1 h，空冷	L	910	865	15.3	39.3
			LT	945	902	13.7	38.3
		800℃，1 h，空冷	L	915	857	15.3	36.5
			LT	930	882	14.8	40.5

板材的室温取向均匀性见表 7.2-313。

表 7.2-313　TA15 钛合金板材的室温取向均匀性

品种	δ/mm	状态	取样方向	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ/%
板材	1.0	750℃，15 min，空冷	L	1 085	887	13.9	—
			45°	974	944	16.4	—
			LT	1 080	813	14.4	—
	3.0	750℃，25 min，空冷	L	1 049	932	9.5	—
			45°	962	933	13.3	—
			LT	1 106	1 054	11.4	—
	15	750℃，1 h，空冷	L	911	839	9.3	24.9
			45°	920	873	11.9	43.6
			LT	963	919	12.6	38.1

各种温度下的拉伸性能见表 7.2-314。

③ 压缩性能见表 7.2-315。

④ 冲击性能见表 7.2-316。

⑤ 弯曲性能见表 7.2-317。

⑥ 扭转与剪切性能　扭转性能见表 7.2-318。

⑦ 热稳定性　试样热暴露后的室温力学性能见表 7.2-319。

表 7.2-314　TA15 在不同温度下的拉伸性能

品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	θ /℃	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
厚板	45	退火	T	-196	1 373	1 324	6①	20~30
棒材	≤50		L					
棒材	18	800℃，1 h，空冷	L	20	1 014	970	16.0	48.1
				100	917	871	17.9	51.4
				200	843	762	17.9	52.8
				300	795	691	16.3	52.9
				350	771	670	16.2	53.9
				400	754	651	17.6	57.1
				500	772	604	23.6	60.7
				550	622	541	29.8	74.5
	40	800℃，1 h，空冷	L	20	977	905	16.4	45.6
				350	741	614	15.5	51.1
				500	676	551	22.7	59.8
				550	622	521	30.1	68.3

① 断后伸长率为 δ_{10}。

表 7.2-315　TA15 钛合金的压缩性能

品种	δ 或 d /mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_{bc} /MPa	$\sigma_{pc0.2}$ /MPa
板材	1~3	退火	LT	20	981~1 177	834~1 030
				200	735~932	637~834
棒材	—	退火	L	20	1 422	863

表 7.2-316　TA15 钛合金的冲击性能

品种	δ 或 d/mm	状态	取样方向	θ/℃	a_{KU}/kJ·m^{-2}
厚板	15	退火	LT	20	640
棒材	18		L		454
	40		L		454
	180		LT		503
	300				440
框模锻件	100		L		456

表 7.2-317　TA15 钛合金的弯曲性能

品种	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	弯曲半径 /mm	α/ (°)
板材	1.0	退火	LT	20	1.0	32.4
	3.0				3.0	27.4
	6.0				9.0	>30

表 7.2-318　TA15 钛合金的扭转性能

品种	状态	取样方向	θ/℃	σ_b	$\tau_{p0.3}$	$\tau_{p0.01}$
				MPa		
棒材	退火	L	20	775	549	451

表 7.2-319 TA15 钛合金试样热暴露后的力学性能

品种	δ或d /mm	状态	热暴露条件 θ/℃	热暴露条件 t/h	σ_b /MPa	δ_5/%	ψ/%	α /(°)
板材	2	退火	未暴露		961	10	—	49
			300	1 000	961	8	—	47
				2 000	981	8	—	42
				3 000	990	8	—	50
				5 000	1 010	8	—	50
			400	1 000	1 000	8	—	47
				2 000	1 049	9	—	40
				3 000	1 059	8	—	47
				5 000	1 088	8	—	46
			500	1 000	1 088	8	—	37
				2 000	1 108	8	—	37
				3 000	1 118	7	—	20
				5 000	1 147	6	—	20
棒材	—	退火	未暴露		932	11	37	—
			300	100	941	14	39	—
				500	932	14	39	—
				1 000	932	14	39	—
				3 000	932	14	38	—
				5 000	951	13	39	—
			400	100	941	13	37	—
				500	932	15	39	—
				1 000	941	15	42	—
				3 000	951	14	38	—
				5 000	961	14	35	—
			500	100	961	15	38	—
				500	951	14	38	—
				1 000	971	14	38	—
				3 000	971	14	38	—
				5 000	981	12	28	—

3）持久和蠕变性能

① 高温持久性能见表 7.2-320。

表 7.2-320 TA15 钛合金的高温持久性能

品种	状态	θ/℃	σ_{100}	σ_{500}	σ_{1000}	σ_{2000}	σ_{5000}
			MPa				
板材和棒材	退火	200	784	—	—	—	—
		350	667 ~ 696	667 ~ 696	667 ~ 696	667 ~ 696	667 ~ 696
		450	588 ~ 618	520 ~ 549	481 ~ 520	451 ~ 490	422 ~ 461
		500	441 ~ 471	314 ~ 333	265 ~ 294	225 ~ 245	196

② 高温蠕变性能见表 7.2-321。

4）疲劳性能

反复弯曲疲劳极限见表 7.2-322。

表 7.2-321 TA15 钛合金的高温蠕变性能

品种	状态	θ/℃	$\sigma_{0.2/100}$	$\sigma_{0.2/500}$	$\sigma_{0.2/1000}$	$\sigma_{0.2/2000}$
			MPa			
板材和棒材	退火	350	539 ~ 588	520 ~ 559	490 ~ 530	471 ~ 490
		450	284 ~ 324	255 ~ 294	216 ~ 245	186 ~ 206
		500	147 ~ 167	88 ~ 98	59 ~ 69	—

表 7.2-322 TA15 钛合金的弯曲疲劳极限

品种	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	N/周	σ_D /MPa
板材	20	退火	LT	20	1	-1	10^7	412
				350				373
				500				353

轴向加载疲劳极限见表 7.2-323。

表 7.2-323 TA15 钛合金的轴向加载疲劳极限

品种	δ或d /mm	状态	取样方向	θ /℃	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	K_t	R	N /周	σ_D /MPa
板材	20	800℃，1 h，空冷	L	20	951	874	1	-1	10^7	730
框模锻件	70	750℃，1 h，空冷	L	20	952	915	1	0.1	10^7	565

薄板、厚板轴向加载疲劳极限见表 7.2-324。

表 7.2-324 TA15 钛合金室温轴向加载疲劳极限

品种	δ /mm	状态	取样方向	θ /℃	K_t	R	f /Hz	N /周	σ_D /MPa
板材	2.5	退火	L	20	1	0.5	110	10^7	730
					1	0.06	110	10^7	554.1
					1	-1	110	10^7	287.1
					3	0.5	110	10^7	345
					3	0.06	110	10^7	241.6
					3	-1	110	10^7	152.1
					5	0.5	110	10^7	167.5
					5	0.06	110	10^7	120.8
					5	-1	110	10^7	98.9
				250	1	0.06	110	10^6	453.3
					3	0.5	110	10^6	258.7
					3	0.06	110	10^6	194.5
					5	0.5	110	10^6	174.1
					5	0.06	110	10^6	115
厚板	45	退火	LT	20	1	0.5	—	5×10^6	681
					1	0.1	—	5×10^6	567.5
					1	-1	—	5×10^6	468
					3	0.5	—	5×10^6	345.5
					3	0.1	—	5×10^6	255
					3	-1	—	5×10^6	197.3

续表 7.2-324

品种	δ /mm	状态	取样方向	θ /℃	K_t	R	f /Hz	N /周	σ_D /MPa
厚板	45	退火	LT	20	5	0.5	—	5×10^6	206
					5	0.1	—	5×10^6	164
					5	−1	—	5×10^6	68.2
				200	1	0.1	—	5×10^6	587.5
					1	−1	—	5×10^6	211
					3	0.1	—	5×10^6	246
					3	−1	—	5×10^6	123.1
				350	1	0.1	—	5×10^6	537.5
					1	−1	—	5×10^6	253.2
					3	0.1	—	5×10^6	313.5
					3	−1	—	5×10^6	114.5

棒材、锻件轴向加载疲劳极限见表 7.2-325。

表 7.2-325　TA15 钛合金室温轴向加载疲劳极限

品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	f/Hz	N/周	σ_D /MPa
棒材	16	退火	L	20	1	0.5	110	10^7	934
					1	0.06	110	10^7	723
					1	−1	110	10^7	415
					3	0.5	110	10^7	375.5
					3	0.06	110	10^7	291
					3	−1	110	10^7	126.6
					5	0.5	110	10^7	199.2
					5	0.06	110	10^7	130.5
					5	−1	110	10^7	64.3
				250	1	0.06	110	10^6	588.3
					1	−1	110	10^6	411.6
					3	0.5	110	10^6	405.5
					3	0.06	110	10^6	234.1
					3	−1	110	10^6	155
	70	退火	L	20	1	0.06	120	10^7	633.3
					3	0.06	135	10^7	236.67
	130	退火	L	20	1	0.06	135	10^7	576.67
	180	退火	L	20	1	0.06	135	10^7	604.3
模锻件	100	退火	L	20	1	0.5	120	10^7	690
					1	0.06	120	10^7	546.6
					1	−1	120	10^7	396.6
					3	0.5	120	10^7	283
					3	0.06	120	10^7	203.3
					3	−1	120	10^7	150
					5	0.5	120	10^7	180.9
					5	0.06	120	10^7	130

续表 7.2-325

品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	f/Hz	N/周	σ_D /MPa
模锻件	100	退火	L	20	5	−1	120	10^7	95.8
				250	1	0.06	120	10^6	480
					1	−1	120	10^6	293.5
					3	0.06	120	10^6	246.6

棒材、锻件焊接接头室温轴向加载疲劳极限见表 7.2-326。

表 7.2-326　TA15 钛合金棒材、锻件焊接接头室温轴向加载疲劳极限

品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	θ /℃	K_t	R	f/Hz	N/周	σ_D /MPa
焊接接头	2.5 板材	退火	—	20	1	0.06	≤100	10^7	456
					3	0.06	≤100	10^7	266.3
	64 潜弧焊	退火		20	1	0.06	100	10^7	490
					3	0.06	100	10^7	270
	64 电子束焊			20	1	0.06	115	10^7	607
					3	0.06	115	10^7	276
				20	1	0.06	115	10^7	562
					3	0.06	115	10^7	294

薄板轴向加载疲劳曲线　光滑疲劳，$K_t=1$，S-N 曲线见图 7.2-43。

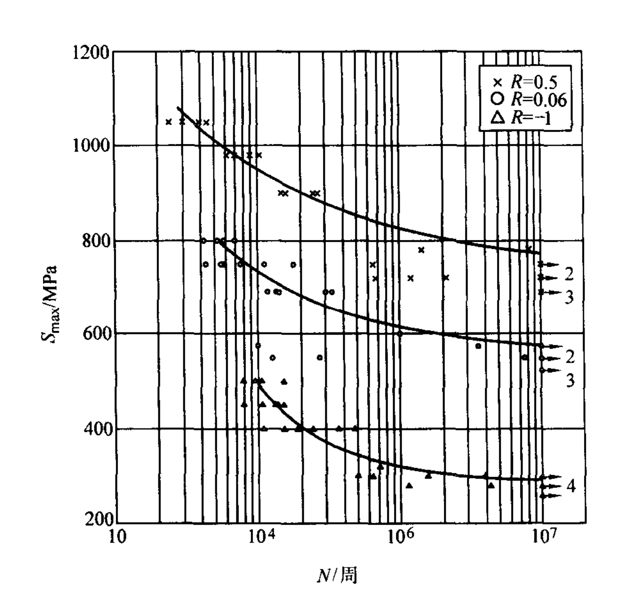


图 7.2-43　TA15 钛合金 2.5 mm 薄板轴向加载疲劳 S-N 曲线 ($K_t=1$)

缺口疲劳，$K_t=3$，S-N 曲线见图 7.2-44。

厚板轴向加载疲劳曲线　光滑疲劳，$K_t=1$，S-N 曲线见图 7.2-45。

缺口疲劳，$K_t=3$，S-N 曲线见图 7.2-46。

棒材轴向加载疲劳曲线　光滑疲劳，$K_t=1$，S-N 曲线见图 7.2-47。

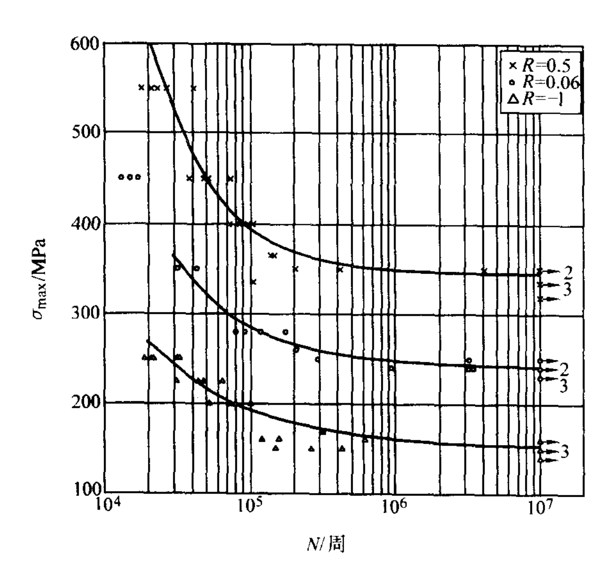


图 7.2-44 TA15 钛合金 2.5 mm 薄板轴向加载疲劳 S-N 曲线 ($K_t = 3$)

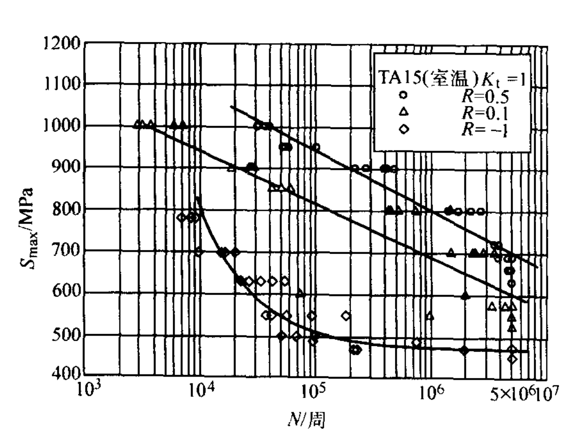


图 7.2-45 TA15 钛合金 45 mm 厚板轴向加载疲劳 S-N 曲线 ($K_t = 1$)

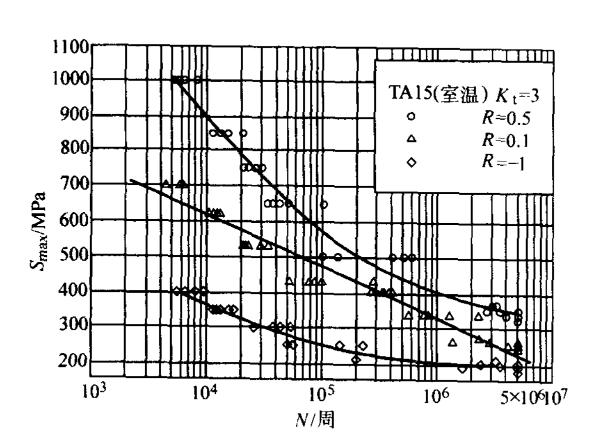


图 7.2-46 TA15 钛合金 45 mm 厚板轴向加载疲劳 S-N 曲线 ($K_t = 3$)

缺口疲劳，$K_t = 3$，S-N 曲线见图 7.2-48。

锻件轴向加载疲劳曲线 光滑疲劳，$K_t = 1$，S-N 曲线见图 7.2-49。

缺口疲劳，$K_t = 3$，S-N 曲线见图 7.2-50。

薄板焊接接头轴向加载疲劳曲线 $K_t = 1$、3，S-N 曲线见图 7.2-51。

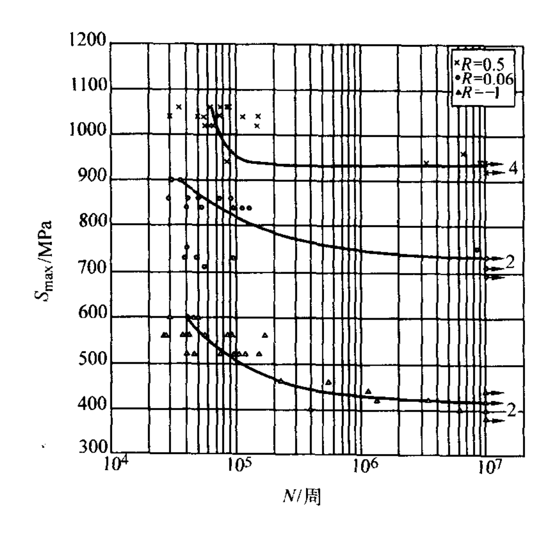


图 7.2-47 TA15 钛合金 ϕ16 mm 棒材轴向加载疲劳 S-N 曲线 ($K_t = 1$)

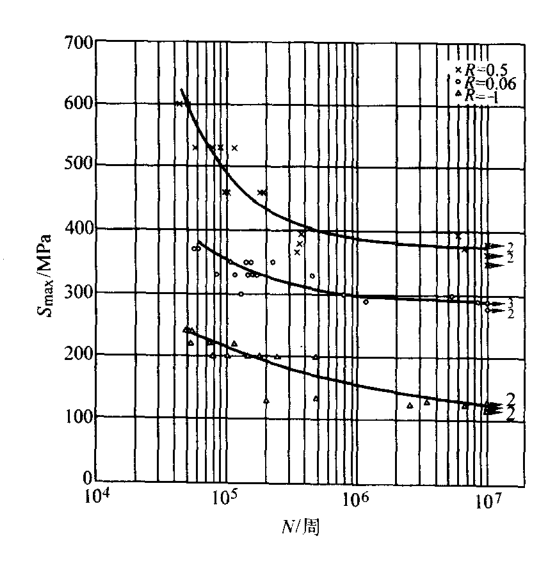


图 7.2-48 TA15 钛合金 ϕ16 mm 棒材轴向加载疲劳 S-N 曲线 ($K_t = 3$)

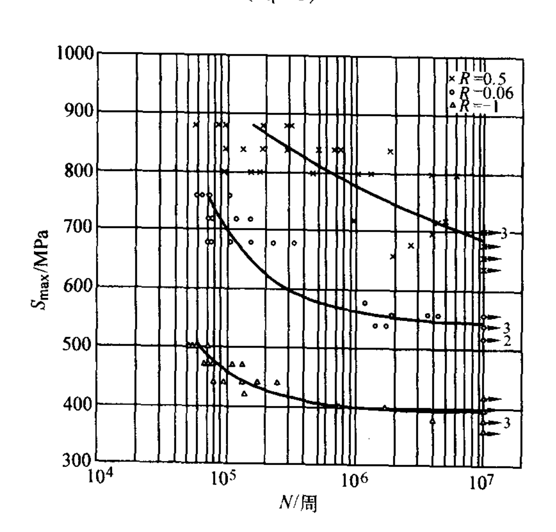


图 7.2-49 TA15 钛合金锻件轴向加载疲劳 S-N 曲线 ($K_t = 1$)

棒材潜弧焊焊接接头轴向加载疲劳曲线 光滑疲劳，$K_t = 1$，S-N 曲线见图 7.2-52。

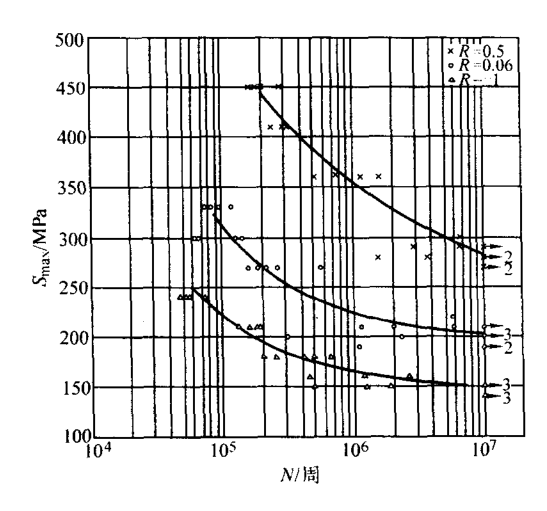


图 7.2-50　TA15 钛合金锻件轴向加载疲劳 S-N 曲线（$K_t=3$）

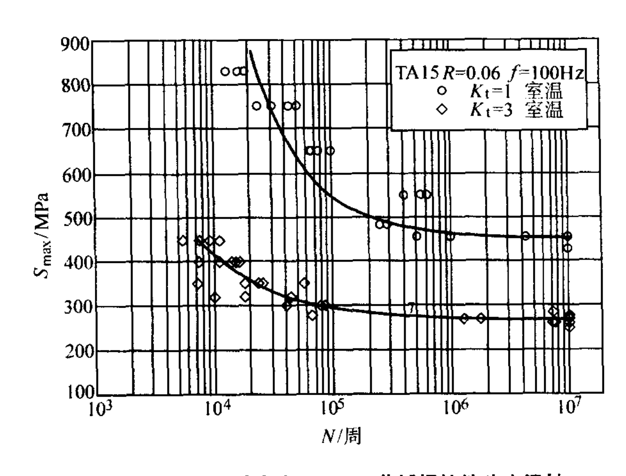


图 7.2-51　TA15 钛合金 2.5 mm 薄板焊接接头室温轴向加载疲劳 S-N 曲线

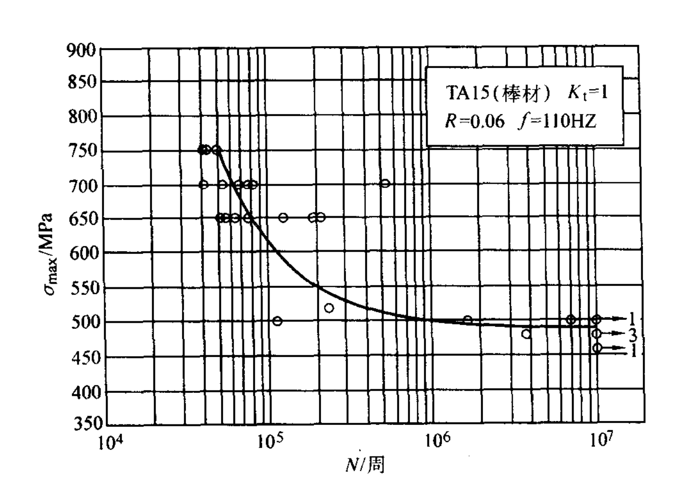


图 7.2-52　TA15 钛合金潜弧焊焊接接头室温轴向加载疲劳 S-N 曲线（$K_t=1$）

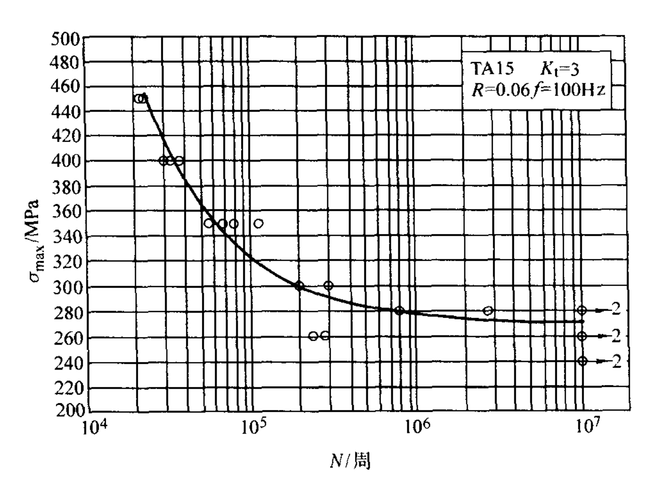


图 7.2-53　TA15 钛合金潜弧焊焊接接头室温轴向加载疲劳 S-N 曲线（$K_t=3$）

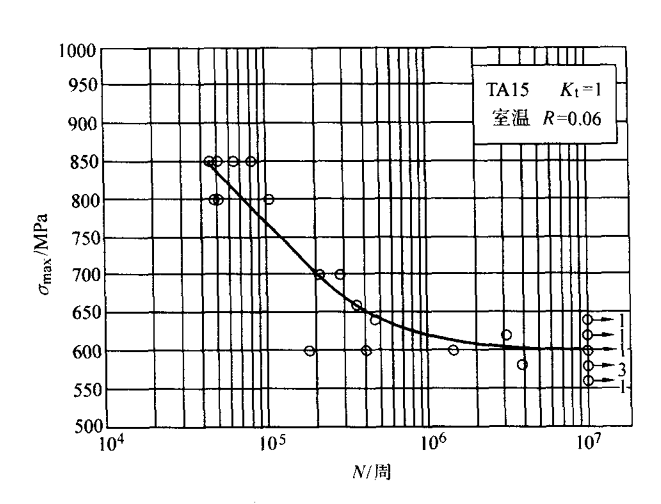


图 7.2-54　TA15 钛合金棒材电子束焊焊接接头室温轴向加载疲劳 S-N 曲线（$K_t=1$）

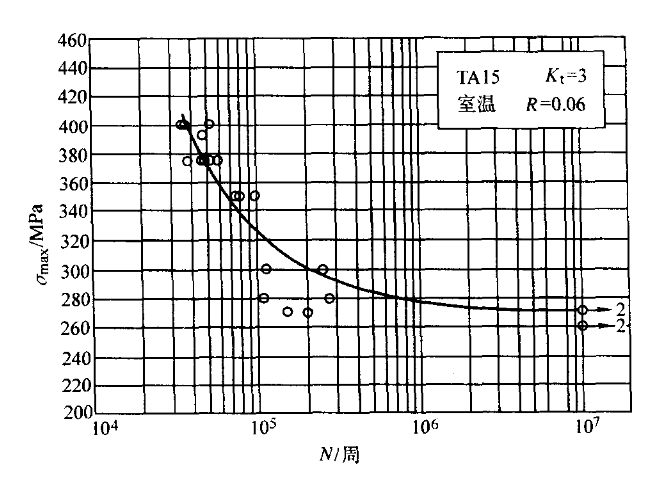


图 7.2-55　TA15 钛合金棒材电子束焊焊接接头室温轴向加载疲劳 S-N 曲线（$K_t=3$）

缺口疲劳，$K_t=3$，S-N 曲线见图 7.2-53。

棒材电子束焊焊接接头轴向加载疲劳曲线　光滑疲劳，$K_t=1$，S-N 曲线见图 7.2-54。

缺口疲劳，$K_t=3$，S-N 曲线见图 7.2-55。

5）弹性性能

① 弹性模量见表 7.2-327。

② 切变模量见表 7.2-328。

表 7.2-327 TA15 钛合金的弹性模量

品种	δ 或 d/mm	状态	θ/℃	E/GPa	E_D/GPa	E_c/GPa
板材	1~5	退火	20	118	—	—
			350	93	—	—
			500	80	—	—
			550	73	—	—
厚板	45	退火	20	123	131	—
			350	98	—	—
			500	93	107	—
棒材	≤50		600	—	103	—
			800	—	89	—
棒材	—	退火	20	—	—	121

表 7.2-328 TA15 钛合金的切变模量

品种	状态	θ/℃	G/GPa
棒材	退火	20	44

③ 泊松比 室温泊松比 $\mu=0.39$。

6) 断裂性能 厚板、棒材和模锻件的断裂韧度见表 7.2-329。

表 7.2-329 TA15 钛合金的断裂韧度

品种	规格/mm	状态	试样类型	取样方向	K_{1C}/MPa·$m^{1/2}$
厚板	45	退火	CT	T-L	68.3①
				L-T	73.07, 73.80①
棒材	70	退火	CT	T-L	84.51
	180	退火	CT	T-L	98.70①
				L-T	102.05①
模锻件	—	退火	CT	T-L	82①

① 试样厚度不满足试验方法厚度判据要求，故为 K_Q 值。

14.5 制造工艺和性能

1) 熔炼与铸造 合金应经过两至三次真空自耗电极电弧炉熔炼，转动部件采用三次熔炼。铸件在真空自耗电极电弧凝壳炉中浇注而成。

2) 热处理制度

① 退火 板材、薄壁型材及其零件：700~800℃，15~60 min，空冷；棒材、锻件、模锻件、厚壁型材及其零件：700~850℃，1~4 h，空冷。

② 去应力退火 为了消除由于零件机械加工、板材成形、焊接等形成的内应力采用去应力退火。退火温度为 600~650℃，保温时间为 0.5~8 h，这取决于零件或制件的复杂性和内应力来源。

③ 真空除氢退火 真空除氢的加热温度 600℃~750℃，保温时间根据最大截面厚度而定：≤20 mm 保温 1~2 h；>20~50 mm 保温 2~3 h；>50 mm 保温 >3 h。

3) 热变形工艺及性能 TA15 模锻件的原材料建议采用直径为 65~150 mm 轧棒，而为了制造叶片采用直径为 25~60 mm 轧棒。大型模锻件用的大于 100 mm 的预变形坯料，建议在压力机上进行，在 β 区经过两到三次镦粗-拔长-滚圆，变形量 30%~35%，再在两相区变形 30%~50%；模锻建议在两相区进行。

① 热变形抗力见表 7.2-330。

表 7.2-330 TA15 钛合金的热变形抗力

变形温度/℃	以下变形速率（s^{-1}）的最大变形抗力/MPa			
	10^{-2}	1	10	10^2
700	457	598	642	738
800	278	430	486	572
900	157	251	320	423
1 000	70	107	138	181
1 100	50	70	106	141
1 200	28	50	75	108

② 热变形工艺规范见表 7.2-331。

表 7.2-331 TA15 钛合金的热变形工艺规范

变形类型	加热温度/℃	终锻温度/℃	一火变形量/%
铸锭开坯	1 180	900	20~30
坯料锻造	1 080	900	≥40
压力机模锻①	970~1 000	900	40~50
锻锤模锻	990~1 020	850~900	40~50

① 在制造大规格模锻件时，终锻温度为 850℃，一火变形量为 50%~70%。

4) 板材成形工艺和性能见表 7.2-332。

表 7.2-332 TA15 钛合金板材的成形性能

θ/℃	最小弯曲半径	极限拉深系数	极限翻边系数	极限压窝系数
20	4.0~7.0δ	—	1.2~1.35	—
700~900	2.0~3.5δ	1.3~1.6	1.5~1.7	6~10

对 1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm 不同板材成形性能的研究表明：750℃时，最小相对弯曲半径为 2 mm，极限拉深系数接近 0.57，极限翻边系数为 1.58~1.617，极限压窝系数为 0.17~0.18。

5) 焊接性能 TA15 合金的焊接行为基本上与 α 合金相似，焊接后也不一定要进行稳定化退火。它的马氏体 α′相的强度，接近于 α 相的强度。

TA15 合金的焊接除氩弧焊、电子束焊外，还有各种变化形式（如潜弧焊、穿透焊、双面双弧自动焊）以及电阻焊和钎焊。潜弧焊可将几十毫米（65 mm）的厚板一次性焊透。而穿透焊可以从 T 字形的接头平板背面施焊使 T 形接头一道焊接双面成形，具有很高的焊接效率和焊接质量。

厚 2 mm 板材的自动氩弧焊焊接接头，在其焊接状态、焊后退火状态、焊后 450℃下 100 h 热暴露状态的强度、弯曲角和冲击性能差别不大，接头对热处理不敏感。

TA15 焊接无论添加或不添加填充金属，均可得到满意的焊缝，它可以与多种牌号的变形钛合金（TA0、TA7、TC1、TC2、TC4 和 TC18 等）和铸造钛合金（ZTA7、ZTA15）等互相焊接。焊接接头的强度可达到基体的 90%~95%。

TA15 焊接时可添加纯钛焊丝如 TA0-1 或与其成分相近的焊丝 TA15-1 和 TA15-2 等进行焊接。采用纯钛焊丝焊接时接头强度稍低，但具有较好的塑性。采用相同牌号的焊丝所焊接头则具有较高的强度。

① 手工钨极氩弧焊焊接工艺参数见表 7.2-333。

表 7.2-333 TA15 钛合金和手工钨极氩弧焊焊接工艺参数

焊接材料	δ/mm	坡口型式	填充材料	焊接层数	焊丝直径/mm	I/A	v/mm·s^{-1}
板材	1.0	$\alpha=45°$	TA0-1	1	1.6	40～50	2～3
	3.0			2	Ⅰ层 3.0	140	2.6
					Ⅱ层 1.6	70	2.2

② 钨极氩弧焊接头力学性能见表 7.2-334 和表 7.2-335。

③ 薄板的对接拼焊和穿透焊　表 7.2-336 为 TA15 薄板 δ1.8 mm、δ2.0 mm、δ2.5 mm 对接拼焊的性能以及平板 δ1.8 mm 和肋 δ1.5 mm 的穿透焊性能。

④ 厚板的潜弧焊　表 7.2-337 为 TA15 厚板潜弧焊焊接接头的性能（L 向）。

表 7.2-334 钨极氩弧焊接头的力学性能

焊接材料	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_b/MPa	δ_5/%	断口位置	弯曲半径/mm	α/(°)
板材	1.0	基体 750℃，15 min，空冷	LT	-70	1 465	15.8	—	—	—
				20	1 084	11.2	—	1.0	32.4
				500	765	9.1	—	—	—
		焊接 +600℃，1 h，炉冷	LT	-70	1 457	10.2	热影响区	—	—
				20	1 114	9.8	基体	1.25	43.0
				500	739	7.7	基体	—	—
	3.0	基体 750℃，25 min，空冷	LT	20	1 116	11.5	—	3.0	27.4
				500	805	7.1	—	—	—
		焊接 +600℃，1 h，炉冷	LT	20	1 090	7.3	热影响区	3.0	23.9
				500	418	6.9	焊缝	—	—

表 7.2-335 TA15 钛合金钨极氩弧焊接头的力学性能

焊接材料	焊接方式	δ/mm	填充材料	焊后热处理	θ/℃	σ_b/MPa	α/(°)	a_{KU}/kJ·cm^{-2}	σ_{100}/MPa	σ_D/MPa
板材	非熔化电极自动氩弧焊	≤3.0	无填料	650℃，1 h 退火	20	932	40	—	—	451③
					350	726	—	—	677	—
					500	686	—	—	451	294③
					550	588	—	—	255	—
		4.0～8.0	TA15-1①	650℃，1 h 退火	20	932	—	392	—	—
					350	716	—	—	—	—
					500	686	—	—	—	—
锻件	熔化电极自动氩弧焊	15～20	TA15-2②	650℃，1 h 退火	20	902	—	588	—	275④
					300	588	—	—	—	—

① TA15 合金 1 号焊丝。
② TA15 合金 2 号焊丝。
③ 反复弯曲疲劳极限，$N=2\times10^7$ 周。
④ 旋转弯曲疲劳极限，$N=2\times10^7$ 周。

表 7.2-336 TA15 薄板拼焊和穿透焊（LT 向）焊接接头室温性能

接头形式	接头厚度/mm	取样方向		σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	接头强度系数/%
对接拼焊	1.8	LT	焊缝	1 045	919	7.3	100
			母材（T）	946	887	15	
	2.0	LT	焊缝	1 076	985	6.9	100
			母材（T）	997	902	17.3	
	2.5	LT	焊缝	960	897	6.1	—
			母材（T）	—	—	—	
		L	焊缝	959	885	6.0	90.5
			母材（T）	1 060	970	15	
穿透焊	平板 1.8 + 肋 1.5	—	焊缝	882	—	4.6	93.1
			1.8 平板（LT）	947	—	15.0	

表 7.2-337 TA15 厚板潜弧焊焊接接头室温拉伸性能

品种规格	取样位置	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	冲击韧度/J·cm^{-2}	接头强度系数/%
24 mm 锻棒	焊缝	931	857	10.8	17.8	65	94.8
	母材	982	913	14.3	44.7	51.5	
64 mm 锻棒	焊缝	923	847	12.0	21.5	68	94.0
	母材	982	913	14.3	44.7	51.5	
45 mm 厚板	焊缝	950	864	8.9	23.3	51	95.2
	母材	998	945	13.7	35	53.5	

⑤ 锻件的电子束焊 表7.2-338为TA15锻件电子束焊室温、高温拉伸性能。

⑥ TA15合金与其他钛合金焊接的接头力学性能见表7.2-339。

表7.2-338 TA15锻件电子束焊室温、高温拉伸性能

材料规格		$\sigma_{p0.2}$/MPa		σ_b/MPa		接头强度系数/%	δ_5/%		ψ/%		断裂位置
		焊接接头	基体	焊接接头	基体		焊接接头	基体	焊接接头	基体	
24 mm	最大值	996	985	1 062	1 010	100	11.4	16.6	44.3	50.3	母材
	最小值	978		1 029	991		10.6	15.0	40.5	45.9	
	平均值	981		1 040	999		11.1	15.6	42.2	47.8	
64 mm	最大值	993	—	1 060	994	100	10.4	13.8	39.5	41.3	母材
	最小值	972		1 015	979		10.2	13.6	38.8	39.7	
	平均值	984.7		1 038	985		10.3	13.7	39.1	40.3	

表7.2-339 TA15钛合金与TC4自动氩弧焊焊接接头的力学性能

焊接材料	焊接方式	δ/mm	填充材料	焊后热处理	θ/℃	σ_b/MPa	α/(°)	a_{KU}/kJ·cm^{-2}
TA15+TC4（板材）	非熔化电极自动氩弧焊	3.0	无填料	800℃，1 h 退火	20	902	44	343
					350	598	—	—
					500	510	—	—

⑦ TA15合金与其他钛合金点焊的力学性能见表7.2-340。

表7.2-340 TA15钛合金与其他钛合金点焊的力学性能

焊接材料	δ/mm	焊后热处理	θ/℃	P_τ/N·点$^{-1}$	P_b/N·点$^{-1}$
TA15+TA15	1.0+1.0	未热处理	20	9 807	—
	1.5+1.5			14 710	4 413
	2.0+2.0			22 555	5 884
TA15+TC2	1.5+1.5	未热处理	20	15 690	4 903
TA15+TA7	1.5+1.5	未热处理	20	9 807	4 413

6) 化学铣削工艺试验 钛合金化铣技术关键是解决化铣溶液以及化铣溶液与化铣保护胶的配套性能。选择化铣溶液时不仅需要考虑化铣溶液的腐蚀速度，还要考虑化铣后材料表面状态和材料性能是否会发生较大变化，如化铣对材料表面粗糙度、材料氢含量、材料力学性能的影响。一种可靠的化铣溶液除了应具有比较快而且相对稳定的腐蚀速度，化铣溶液具有比较长的寿命，工艺控制方法容易，不增加材料的表面粗糙度和氢含量，不降低材料的力学性能；同时对化铣保护胶腐蚀性低，以利于化铣保护胶的选择。表7.2-341～表7.2-343列出了TA15合金化铣前后的表面粗糙度、氢含量和力学性能，从试验数据可以看出，化铣后表面粗糙度与原材料基本相同，化铣后材料的总氢含量并未增加，化铣前后材料的屈服强度、抗拉强度、延伸率基本相同，化铣前后疲劳性能也基本相当。因而，TA15合金适合用于现行的钛合金化铣溶液，化铣后材料的各种性能与原材料相当。与BT20合金相比，TA15合金的化铣加工性能与BT20相当，对比情况见表7.2-344。

表7.2-341 化铣前后材料表面粗糙度对比

项目	原材料	1	2	3	4
厚度/mm	2.5	2.2	2.0	1.9	1.7
粗糙度 R_a/μm	0.572	0.594	0.654	0.517	0.454
溶液温度/℃	—	35	30	40	40

14.6 选材及应用

TA15为中强度级别的钛合金，有良好的综合力学性能和工艺性能，比TC4钛合金有较高的强度和焊接性能。该合金长时间（3 000 h）工作温度可达500℃，瞬时（不超过5 min）可达800℃。450℃下工作时，寿命可达6 000 h。主要制造500℃以下长时间工作的结构零件和焊接承力零部件。应用于发动机的各种叶片、机匣；飞机的各种钣金件、梁、接头、大型壁板、焊接承力框等；焊接结构件和铸件也广为选用。

表7.2-342 TA15材料化铣前后总氢含量对比

项目	原材料	1	2	3	4
厚度/mm	2.5	2.2	2.0	1.9	1.7
氢含量/10^{-6}	30	29	25	30	27
增氢量/10^{-6}		-1	-5	0	-3

表7.2-343 TA15化铣前后材料力学性能对比

项目	$\sigma_{p0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ_5/%	N/周①
原材料	1 055.2	932.9	10.7	108 122
化铣后材料	1 055.2	934.3	11.3	145 527

① 试验条件：室温，$R=0.1$；$K_t=1$；$\sigma_{max}=735$ MPa；$F=105\sim114$ Hz。

表7.2-344 TA15和BT20材料化铣前后综合对比

项目	BT20		TA15	
	原材料	化铣	原材料	化铣
氢含量/10^{-6}	29	23	30	27
表面粗糙度 R_a/μm	0.461	0.418	0.572	0.517
屈服强度/MPa	969.4	1 026.7	932.5	934.2
抗拉强度/MPa	998.6	1 085.5	1 055.2	1 055.2
延伸率/%	8.6	9.1	10.7	11.3
疲劳性能（化铣/原材料）	1.36		1.35	

由于TA15的广泛应用，实际合金成分的控制常常要考虑半成品的品种，在合金成分范围内薄板的Al含量偏低，而锻件和厚板的成分均取中上限，特别是大型锻件。

TA15合金零件，应该考虑钛合金零件设计的通用原则，如在一般气候条件下使用时钛合金零件不需要附加表面保

护，允许不附加保护与不锈钢、镍基合金接触。在海洋性气候条件下工作，温度高于300℃时应该采用保护涂层或限制工作寿命。当工作中与负电性材料接触时，应在钛合金零件上附加涂层，以防止被接触零件的接触腐蚀。钛合金零件不允许铝合金和结构钢直接接触，必须采取合理有效的防护措施。当在同一部件中由镀镉的钢零件时，设计时应避免采用钛合金，如果钛合金零件不得不与带镀镉的钢零件处于同一部件中，则该部件的工作温度不应超过100～150℃。

图7.2-56为TA15焊接的飞机加强框示意图。

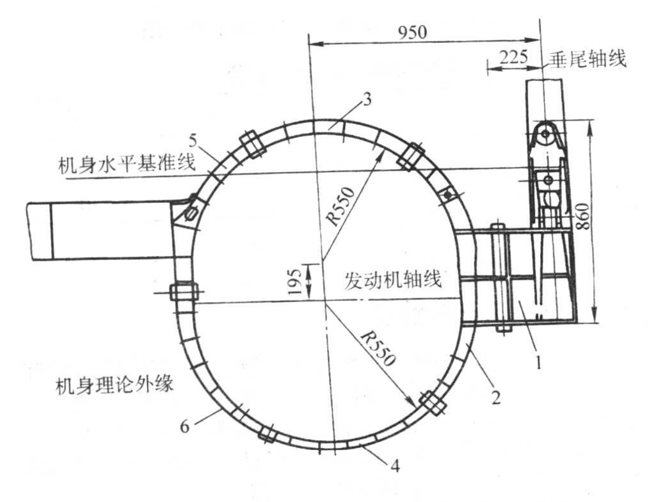


图7.2-56 苏-27CK飞机后机身42框焊接装配示意图

1—垂尾接头梁；2—外侧框段；3—上框段；4—下框段；5—内侧上框段；6—内侧下框段

15 TC20钛合金

TC20合金是一种中高强度的近α型钛合金，名义成分为Ti-6Al-7Nb，钼当量约2.1，铝当量为7.0，具有优异的生物相容性，一般在退火状态下使用。，在机械性能、韧性以及疲劳强度方面与TC4（Ti-6Al-4V）合金相当，用于人体外科植入物。于1985年开展临床应用。

1）材料牌号　TC20。

2）相近牌号　IMI367（英国）。

15.1 化学成分

国标规定的化学成分见表7.2-345。

表7.2-345 TC20钛合金化学成分（质量分数） %

合金元素		杂质≤					
Al	Nb	Fe	C	N	H	O	Ta
5.5～6.5	6.5～7.5	≤0.25	≤0.08	≤0.05	≤0.009	≤0.20	≤0.50

15.2 物理及化学性能

1）密度4.54 g/cm³。

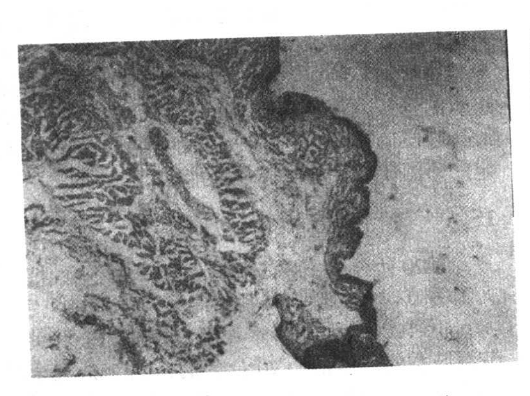
2）磁性能　无磁性。

3）耐腐蚀性能良好。

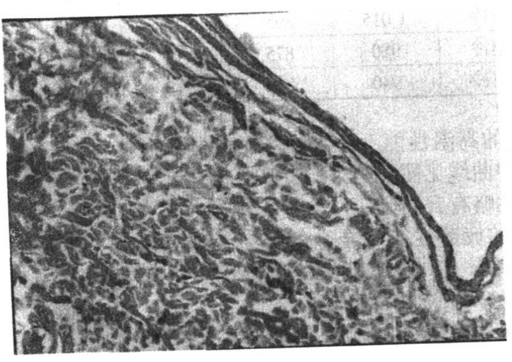
4）生物相容性　合金具有良好的生物相容性，并和骨组织形成良好的骨结合。见图7.2-57。

15.3 相变及显微组织

1）相变　相变与TC4（Ti-6Al-4V）合金相当，相变温度α+β↔β为990～1 010℃。开坯温度为β单相区，成品锻造温度控制在α+β两相区。热处理制度为简单退火。



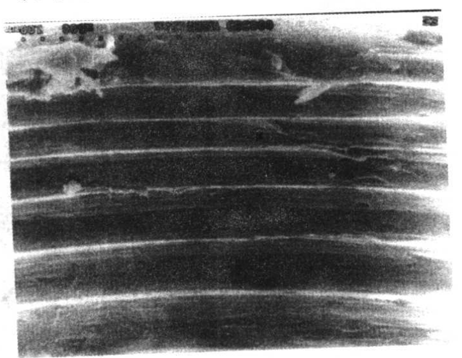
(a) 口腔黏膜刺激实验组织观察(HE×100)



(b) 皮下埋植实验组织观察12周后(HE×200)



(c) 骨埋植实验组织观察,12周后(三染×300)



(d) 埋植12周后的扫描电镜观察(×300)

图7.2-57 生物学性能实验结果观察

2）显微组织 显微组织达到欧洲钛加工技术委员会ETTC2（European Titanium Products Technical Committee）标准A1~A9级。TC20钛合金棒材经700℃/h空冷，退火后的金相组织见图7.2-58，由α相和β相组成，合金的组织为大量α相+少量β相。

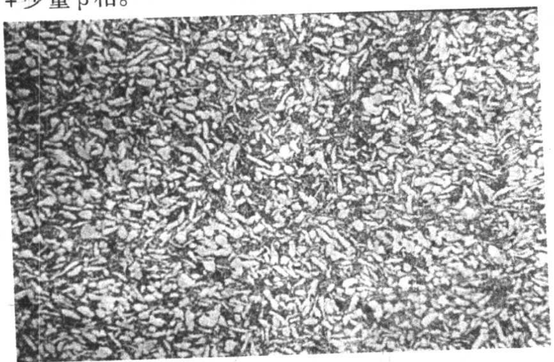


图7.2-58 TC20钛合金棒材的金相组织（×200）

15.4 力学性能

1）技术标准规定的性能见表7.2-346。

表7.2-346 TC20钛合金的技术标准规定的室温拉伸性能

规格	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
棒材	≥900	≥800	≥10	≥25

2）退火温度对室温拉伸性能的影响见表7.2-347。

表7.2-347 退火温度对TC20钛合金18 mm轧棒拉伸性能的影响（3 t锭）

退火温度	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
600℃/h，空冷	1 030	943	17	45
700℃/h，空冷	1 020	923	16	46
750℃/h，空冷	1 015	895	16	44
800℃/h，空冷	980	875	18	46
850℃/h，空冷	940	840	18	47

3）合金的高温性能 TC20钛合金ϕ16 mm棒材经退火后，高温拉伸曲线见图7.2-59，随着退火温度的升高，强度值降低，塑性略有升高。

4）合金的疲劳性能 合金的疲劳性能列于表7.2-348，TC20钛合金高周（10^7）的疲劳强度620 MPa与瑞士Protasul-100合金的620 MPa相当。

5）合金的断裂韧度 合金的断裂韧度K_{1C}=64 MPa·m$^{1/2}$。

6）合金的其他性能 硬度HB=288。

冲击韧度a_{KV}=45 J/cm^2。

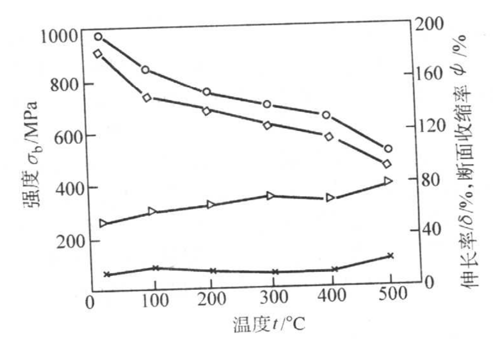


图7.2-59 TC20钛合金的高温拉伸曲线

表7.2-348 合金的疲劳性能

合金	热处理	应力/MPa	K_t	N/周
TC20	退火；	620	1.0	10^7
Protasul-100		620	1.0	10^7

弹性模量E=115 GPa。

15.5 制造工艺和性能

1）熔炼工艺 选用一级海绵钛、纯铝、及铝铌或钛铌中间合金为原料，按名义成分配料→压制电极→二次或三次真空自耗熔炼得到成分均匀的合格铸锭，重点应解决铌的均匀性。

2）热处理工艺 TC20钛合金为棒材合金在电炉中进行热处理，采用简单退火工艺即700℃/h，空冷。

3）变形工艺和性能 TC20钛合金属于α+β型钛合金，其热加工工艺与TC4相似，一般铸锭的加热温度为1 150~1 200℃，随后的加工可逐渐降低加工温度，逐渐由β相区过渡到α+β两相区。成品棒材在α+β两相区进行锻造和其他形式的加工，并保证有足够的变形量。常规的加工一般均在两相区（一般为T_β减去20~100℃），经多次变形，其变形量可控制在50%~70%，这样足够的变形量可以破碎β晶界，获得细小的α+β组织，同时还可防止网状α和拉长α组织的形成。合金经热锻、精锻、热轧成直径110 mm、60 mm、30 mm、20 mm和12 mm的棒材，均能满足技术标准规定的室温拉伸性能和其他性能。

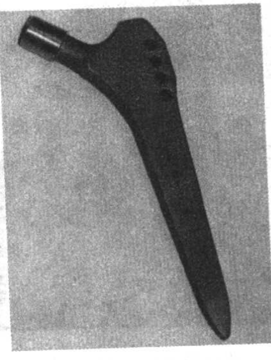
15.6 材料选择和临床应用

TC20钛合金主要应用于各种人体外科植入物，如各种人工关节，骨骼矫正和紧固件等。

1）TC20合金非骨水泥矩形直柄 全髋关节为组合式关节假肢系列，包括TC20合金柄，CoCrMo合金球头和超高分子髋臼，其中柄的规格有3种，球头3种，髋臼有5种，柄具有配套专用工具，见图7.2-60。



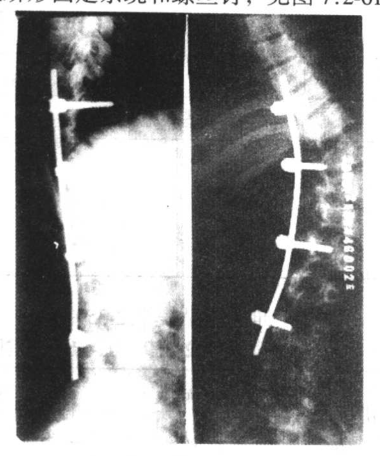
(a)髋关节及手术器械



(b)股骨头

图7.2-60 TC20合金非水泥矩形直柄股骨头

2）TC20 合金脊柱矫形固定系统和螺丝钉，见图 7.2-61。



(a) 特发性脊柱侧弯术后7月X射线图



(b) 右肱骨外科骨折术后6月X射线图

图 7.2-61　临床应用照片

16　Ti-31 钛合金

Ti-31 合金是 Ti-Al-Mo-Zr-Ni 合金，是一种新型中强耐蚀钛合金，属于低合金化的近 α 型钛合金，其中 Al 是主要强化元素，Mo 是提高合金的抗应力腐蚀及耐热性，Zr 能改善焊接性能，Ni 提高合金抗缝隙腐蚀能力，但强烈降低延性，因而要严格控制 Ni 元素的含量。Ti31 钛合金集中等强度、高的塑性、良好的易加工性和成型性、优异的耐蚀性、可焊性于一体，是新型高温耐蚀钛合金。

Ti-31 钛合金适于锻造、轧制、拉伸等加工，产品形式多样化，可加工成板材、棒材、管材、锻件、型材和丝材等形式。合金还具有良好的工艺性，可进行冲压、弯曲、切削加工，另外，合金还具有优异的焊接性。目前，Ti-31 合金已制成各种形状法兰、异径三通管、管座及阀门等部件，其中大部分是小锻件机加工而成。该合金只在退火状态下使用，不能采用固溶时效处理进行强化。Ti-31 合金在舰船、化工、海洋工业和民用行业中获得应用。

16.1　化学成分

Ti-31 钛合金化学成分（暂行）技术条件见表 7.2-349。

表 7.2-349　Ti-31 钛合金化学成分（质量分数）　%

合金元素					杂质≤							
Al	Mo	Ni	Zr	Ti	Fe	C	N	Si	H	O	其他元素 单个	其他元素 总和
2.5 ~ 3.2	0.6 ~ 1.2	0.4 ~ 1.0	0.8 – 1.5	余量	0.30	0.10	0.05	0.15	0.015	0.15	0.10	0.40

16.2　物理及化学性能

1）密度 $\rho = 4.5\ g/cm^3$。

2）热导率见表 7.2-350。

表 7.2-350　Ti-31 钛合金热导率

$\theta/℃$	100	200	300	400	500
$\lambda/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	10.0	13.0	13.5	15.0	17.0

3）线胀系数见表 7.2-251。

表 7.2-351　Ti-31 钛合金线胀系数

$\theta/℃$	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400	20 ~ 500
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	11.36	11.03	10.18	9.89	9.88

4）电性能　电阻率见表 7.2-352。

表 7.2-352　Ti-31 钛合金电阻率

$\theta/℃$	100	200	300	400	500
$\rho/\mu\Omega \cdot m$	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7

5）磁性能　无磁性。

16.3　相变及显微组织

1）相变温度　α+β↔β 相的转变温度为 940 ~ 960℃。

2）显微组织　合金在平衡状态下由 α 相和少量晶间 β 相组成。

16.4　力学性能

1）技术标准规定的性能见表 7.2-353。

表 7.2-353　技术标准规定的 Ti-31 钛合金性能

技术标准	品种	状态	规格/mm	室温 σ_b/MPa	室温 $\sigma_{p0.2}/MPa$	室温 $\delta_5/\%$	室温 $\varphi/\%$	室温 $a_{KU}/kJ \cdot m^{-2}$	室温 $K_{IC}/MPa \cdot m^{1/2}$	350℃ $\sigma_{p0.2}/MPa$	350℃ $\sigma_b(3\ 000\ h)/MPa$
				≥							
板材（暂行）技术条件	板材	退火	$\delta = 1.0 \sim 20.0$	637	490	18	35	588	77	294	250
棒材（暂行）技术条件	棒材	退火	$\delta = 50 \sim 85$	637	490	18	35	588		294	250
饼材（暂行）技术条件	饼材	退火	$\phi 60 \sim 150 \times \leqslant 300$	637	490	18	35	588		294	250

续表 7.2-353

技术标准	品种	状态	规格/mm	室温						350℃	
				σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	φ/%	a_{KU}/kJ·m^{-2}	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$	$\sigma_{p0.2}$/MPa	σ_b(3 000 h)/MPa
				≥							
管材（暂行）技术条件	管材	退火	$\phi73\times5$ $\phi40\times4.5$ $\phi15\times1.25$ $\phi10\times1$	637	490	18	—	—	77	—	250

2）室温及各种温度下的力学性能

各种规格板材的拉伸性能见表 7.2-354。方向对厚度为 16 mm 的 Ti-31 合金板材力学性能的影响见表 7.2-355。锻板拉伸性能见表 7.2-356。

表 7.2-354 Ti-31 合金板材性能

规格/mm	室温拉伸				350℃拉伸					a_{KU}/kJ·m^{-2}	
	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	φ/%	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	φ/%	σ_b(3 000 h)/MPa	基材	焊接头
δ = 16	675	645	23	53	435	375	20	65	250	960	740
δ = 4	760	—	26	48	480	415	26	73	250		
δ = 2	730	—	33	—	445	390	30	—	250		

表 7.2-355 方向对 16 mm 厚的 Ti-31 合金板材力学性能的影响

方向	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	φ/%
L	675	645	23	53
T	665	600	23	43

表 7.2-356 Ti-31 合金锻板性能

室温拉伸				350℃拉伸				冲击韧性
σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	φ/%	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	φ/%	a_{KU}/kJ·m^{-2}
672	603.3	24.6	51.3	445	303.3	23.6	65.7	939

棒材拉伸性能见表 7.2-357。

表 7.2-357 Ti-31 合金棒材性能

规格/mm	室温拉伸				350℃拉伸					冲击韧性
	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	φ/%	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	φ/%	σ_b(3 000 h)/MPa	a_{KU}/kJ·m^{-2}
ϕ60 ~ 90	655	600	24	45	440	305	27	70	350	800
ϕ16 ~ 130	655	600	20	50	430	—	—	—	350	800

不同规格管材拉伸性能见表 7.2-358。

表 7.2-358 Ti-31 合金不同规格管材拉伸性能

规格/mm	室温拉伸			350℃拉伸		
	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%
(ϕ10 ~ 15) × (1 ~ 1.5)	675	600	24	410	330	20
(ϕ40 ~ 73) × 5	675	600	18	410	—	—

饼材拉伸性能见表 7.2-359。

表 7.2-359 Ti-31 合金饼材性能

饼材规格/mm	室温拉伸				高温拉伸				冲击韧度
	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	φ/%	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	φ/%	a_{KU}/kJ·m^2
(ϕ200 ~ 400) × (60 ~ 80)	660	580	20	50	440	320	23	70	800

3）持久和热暴露性能

① 350℃持久性能见表 7.2-360。

表 7.2-360 Ti-31 合金 350℃持久性能

σ/MPa	残余伸长率/%	试验持续时间/h	备注
250	0.732	3 140	未断
300	1.148	3 140	未断
350	1.050	3 642	未断
400	—	2 292	未断

② 350℃热暴露后合金性能见表 7.2-361。

表 7.2-361 Ti-31 合金 350℃热暴露后性能

热暴露时间/h	σ_b/MPa	δ_5/%	φ/%	a_{KU}/kJ·m^{-2}
100	731	19	53	934
300	736	18	51.5	841
500	736	17	52	1 017
1 000	735.3	17.3	47.6	909

4）断裂韧度 Ti-31 合金基材和焊接热影响区的断裂韧度见表 7.2-362。

表 7.2-362 Ti-31 合金断裂韧度

方向	$J_{0.2}$/kJ·m^{-2}	$KJ_{0.2}$/MPa·m$^{1/2}$	基体/MPa·m$^{1/2}$	焊接接头/MPa·m$^{1/2}$
TL	105	112	110	108
TS	112	115	—	—
LT	74	94	—	—

5）低周疲劳性能见表 7.2-363。

表 7.2-363 Ti-31 合金低周疲劳性能

试验条件	冷却方式	低周疲劳性能	
		过渡寿命 $2N_T$	$\Delta\varepsilon$/%
波形：三角波形 应变速率：0.004/s 应变频率：$f=\varepsilon/\varepsilon'\times10^6$	FC	556	1.26
	AC	758	1.12

6）弹性性能　见表 7.2-364。

表 7.2-364　Ti-31 钛合金弹性模量

θ/℃	20	100	200	300	400	500
E/GPa	108	104	95	90	80	75

16.5　制造工艺和性能

1）热处理制度

① 普通退火　板材：700～800℃，1～2 h，空冷；棒材和锻件：700～820℃，1～2 h，空冷。

② 真空退火　管材：700～800℃，1～2 h，空冷，采用有冷却室的真空炉。

2）管材工艺性能　Ti-31 合金 ϕ10 mm×1 mm、ϕ15 mm×1.25 mm 两种规格的管材扩口、压扁、弯曲试验结果见表 7.2-365。压扁试验其压板按下式进行计算

$$H=\frac{(1+a)\ S}{a+S/D}$$

式中，H 为压板间距，mm；S 为管材公称壁厚，mm；D 为管材公称外径，mm；a 为常数，TA1 取 0.07，TA2 取 0.06。

扩口试验采用顶芯锥度 60°的工具。弯曲试验做了不同弯曲半径的充芯与空芯的弯曲试验。扩口、压扁、弯曲试验结果见表 7.2-365。

表 7.2-365　Ti-31 合金管材工艺性能

实验项目及条件			ϕ15 mm×1.25 mm	ϕ10 mm×1 mm
扩口	60°锥头，扩口量 50%		不裂	不裂
压扁	$H=5S$	$a=0.146$	不裂	—
	$H=4.5S$	$a=0.142$	裂	—
	$H=3S$	$a=0.35$	—	不裂
	$H=2S$		—	裂
弯曲	弯曲半径	$D=2d$	不裂	不裂

3）板材室温弯曲角见表 7.2-366。

表 7.2-366　Ti-31 钛合金室温弯曲角

品种	厚度 t/mm	状态	弯曲条件			
			相对弯曲半径	相对宽度	α/(°)	弯曲结果
基材	14	退火	$D=5t$	$b/t=1.5:1$	180	无裂纹
				$b/t=2:1$	135	无裂纹
焊接接头		退火		$b/t=1.5:1$	180	无裂纹
				$b/t=2:1$	135	微裂
基材	2	退火	相对弯曲半径 $D=2t$			无裂纹

4）焊接工艺和性能

① Ti-31 合金配套焊丝性能见表 7.2-367。

表 7.2-367　Ti-31 合金配套焊丝性能

σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	φ/%
618	567	26.7	55

② 氩弧焊缝焊接接头（未退火）的力学性能见表 7.2-368。

③ 巴东试验结果见表 7.2-369。

表 7.2-368　Ti-31 合金缝焊接接头的力学性能

焊接材料	焊接接头/基材					
	α'_b 或 σ_b /MPa	$\sigma_p'{}_{0.2}/\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ'/δ /%	φ'/φ /%	a_{KU}'/a_{KU} /kJ·m^{-2}	弯曲角 /(°)
冷轧板	750/725	625/620	17/23	—	—	180/180
热轧板	685/675	640/630	17/20	46/50	1 100/740	180/180

表 7.2-369　Ti-31 合金缝焊巴东试验结果

部位	肉眼观察	×6 观察	×200 观察
角焊缝	无裂纹	无裂纹	无裂纹
试验焊缝	无裂纹	无裂纹	无裂纹

16.6　选材及应用

1）选材　Ti-31 合金是为核潜艇反应堆一回路而研制的新型高温耐蚀钛合金。该合金含有各种可提高钛合金抗腐蚀性能的合金元素，腐蚀性能与著名的耐蚀钛合金 TA10（Ti-0.3Mo-0.8Ni）的耐蚀性相当，但强度高约 30%～50%，因此，可做耐蚀结构材料使用，可用于既要求耐蚀性又要求强度的部位。该合金已用于取样器的管路、化工厂的设备的手动止截阀门等零部件，可有效提高所属装置的运行指数，降低维修费用，在化工、氯碱等行业有广泛的应用前景。

2）腐蚀试验

① Ti-31 合金高温高压水中腐蚀性能见表 7.2-370。

表 7.2-370　Ti-31 合金高温高压水中腐蚀性能

渗氢条件	渗氢时间/h	状态	氢含量/%		δ/%		a_{KU}/kJ·m^{-2}	
			原始	%	原始	试验后	原始	试验后
高纯水，360℃，19.4 MPa	740	M	0.002	0.002	22	22	—	—
0.7×10^{-6}LiOH，300℃	655	M	0.007	0.006	21	21	758	673
1 mol LiOH，360℃，18.6 MPa	50	M	0.004	0.004	—	—	—	—
	100			0.006	—	—	—	—
	200			0.009	—	—	—	—
	300			0.016	—	—	—	—

② 180℃海水中的腐蚀　180℃海水中的均匀腐蚀见表 7.2-371。

表 7.2-371　Ti-31 合金 180℃海水中的均匀腐蚀

400 h		736 h	
表面观察	腐蚀结果/mg	表面观察	腐蚀结果/mg
暗灰色	+1.54	暗灰色	+0.26

180℃海水中的缝隙腐蚀见表 7.2-372。

Ti-31 合金在 180℃海水中，经过 736 h 浸泡，在两片 Ti-31 合金的缝隙内出现了黄、蓝、紫等颜色，试样的空白部位颜色变暗，没有腐蚀痕迹，耐高温海水缝隙腐蚀。

表 7.2-372　Ti-31 合金 180℃海水中的缝隙腐蚀表面颜色

缝隙形式	自由表面	Ti-四氟乙烯缝	Ti-Ti 垫片（0～0.1 mm）缝	Ti-Ti 接触缝
表面颜色	暗灰色	蓝紫色	蓝紫色	深蓝

③ Ti-31合金在各种介质中的均匀腐蚀性能　Ti-31合金在硝酸中腐蚀性能见表7.2-373。

表7.2-373　Ti-31合金在硝酸中均匀腐蚀性能

温度	硝酸浓度/%	腐蚀率/$mm \cdot a^{-1}$	
		Ti-31	TA10
RT	20	0.001	0.001
	35	0.001	0.001
	50	0.001	0.001
60℃	20	0.02	0.01
	35	0.04	0.01
	50	0.02	0.01
沸腾	20	0.1	0.1

Ti-31合金在硫酸中腐蚀性能见表7.2-374。

表7.2-374　Ti-31合金在硫酸中均匀腐蚀性能

温度	硫酸浓度/%	腐蚀速度/$mm \cdot a^{-1}$	
		Ti-31	TA10
RT	5	0.001	0.001
	10	0.1	0.3
	30	2.5	—
60℃	1.5	0.005	0.003
	5	5.5	5.9
	10	4.9	8.4
沸腾	1.5	2.2	8.3

Ti-31合金在盐酸中腐蚀性能见表7.2-375。

表7.2-375　Ti-31合金在盐酸中均匀腐蚀性能

温度	盐酸浓度/%	腐蚀速度/$mm \cdot a^{-1}$	
		Ti-31	TA10
RT	5	0.001	0.001
	10	0.1	0.1
	15	1.5	1.0
60℃	1.5	0.001	0.001
	5	0.2	0.5
	10	5.5	7.4
沸腾	1.5	0.04	0.07

④ 在高温氯化物中的腐蚀性能　在40% NH_4Cl，30% NaCl，20% $MgCl$沸腾溶液中，Ti-31合金的自接触和Ti-31合金与四氯乙烯接触的缝隙腐蚀后，在高温氯化物中具有良好的抗缝隙腐蚀性能。

⑤ 应力腐蚀断裂韧度见表7.2-376。

表7.2-376　Ti-31合金在天然海水中的应力腐蚀断裂韧度

材料	断裂韧度 $K_{IC}/MPa \cdot m^{1/2}$	应力腐蚀断裂韧度 $K_{ISCC}/MPa \cdot m^{1/2}$	K_{ISCC}/K_{IC}
基材	110	87	0.79
焊接材料	108	104	0.95

17　Ti75钛合金

Ti75是低合金化的Ti-Al-Mo-Zr系具有自主知识产权的近α型钛合金，含有3%的α稳定元素Al，对α相起固溶强化的作用；含有2%的β稳定元素Mo，起到强化β相并改善工艺塑性的功能；还含有中性合金元素Zr，改善合金的焊接性能。Ti75钛合金名义成分的铝当量为3.5，钼当量为2，其主要性能特点是比TA5高的使用强度和很好的工艺塑性。该合金还具有良好的焊接性能和耐腐蚀性能。

Ti75钛合金最适合于制造形状复杂的板材冲压并焊接的零部件，在舰船行业和医用中获得了广泛应用。其主要半成品是板材、棒材、管材、锻件、型材和丝材等。

17.1　化学成分

XB95003—2《Ti75合金棒材》技术标准规定的化学成分见表7.2-377。

表7.2-377　Ti75钛合金化学成分（质量分数）%

合金元素				杂质≤					
Al	Mo	Zr	Ti	Fe	C	N	H	O	Si
2.0~3.5	1.0~2.5	1.0~3.0	余量	0.30	0.10	0.05	0.012	0.15	0.15

17.2　物理及化学性能

1）密度 $\rho = 4.53\ g/cm^3$。

2）热导率见表7.2-378。

表7.2-378　Ti75钛合金热导率

θ/℃	85	200	350	440	543	642	846
$\lambda/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	10.0	11.4	12.2	12.7	15.8	16.7	22.8

3）线胀系数见表7.2-379。

表7.2-379　Ti75钛合金线胀系数

θ/℃	20~100	20~200	20~300	20~400	20~500	20~600
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	10.0	10.0	9.64	9.39	9.36	9.30

4）电阻率见表7.2-380。

表7.2-380　Ti75钛合金电阻率

θ/℃	85	200	350	543	642	846
$\rho/\mu\Omega \cdot m$	1.35	1.49	1.62	1.73	1.77	1.76

5）磁性能　无磁性。

6）抗氧化性能　与TA5相近。

7）耐腐蚀性能

① 均匀腐蚀　在60℃的天然海水中试验23 d，光亮如初，腐蚀率 $< 10^{-4}$ mm/a。

② 缝隙腐蚀与电偶腐蚀　60℃3.5% NaCl溶液中181 d试验，缝隙腐蚀率为0.000 1~0.000 5 mm/a，与B30的电偶腐蚀率为0.000 05 mm/a，电偶腐蚀效应为12%。

③ 应力腐蚀　在室温天然海水中测得Ti75合金的应力腐蚀断裂强度因子 K_{ISCC} 为85.3 MPa $\sqrt{m}$。

④ 冲刷腐蚀　在相对流速为3.07 m/s的天然海水中经20 d实验，腐蚀率 $< 10^{-3}$ mm/a。

17.3　相变及显微组织

1）相变温度　α+β↔β相的转变温度为920℃±20℃。

2）显微组织　合金在平衡状态下由α相和大约7%的少

量β相组成。

17.4 力学性能

1）技术标准规定的性能见表7.2-381

表7.2-381 XB 95003—2技术标准规定的Ti75钛合金性能

室温力学性能					断裂韧度
σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	a_{Kv}/kJ·m^{-2}	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$
730	630	13	25	588	93

2）室温和高温下的力学性能

① 室温拉伸性能　不同直径铸锭制备的板材的拉伸性能见表7.2-382。

表7.2-382 Ti75合金不同直径铸锭制备的板材的性能

铸锭直径/mm	板材厚度/mm	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	a_{KV}/kJ·m^{-2}	α/(°)
150	1.5	792	—	19	—	—	—
	2.5	792	707	16	—	—	—
	3.0	750	630	15	—	—	—
	18	731	666	20	59	1 275	>100
298	18	760	685	20	50	1 200	>100
518	5.5	756	721	21	—	—	—
	14	798	704	15	45	1 590	>100

不同规格管材的拉伸性能见表7.2-383。

表7.2-383 Ti75合金不同规格管材的拉伸性能

尺寸/mm	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
$\phi57\times7$	挤压态	785	676	18	48
$\phi36\times4$	挤压态	710	610	18	—
$\phi27\times1.8$	冷轧态	795	622	20	—
$\phi24\times1.28$	冷轧态	806	677	14	—
$\phi22\times1.0$	冷轧态	749	609	12	—

不同直径铸锭制备的ϕ20 mm棒材性能见表7.2-384。

表7.2-384 Ti75钛合金不同直径铸锭制备的ϕ20 mm棒材性能

铸锭直径/mm	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	a_{KV}/kJ·m^{-2}
90	739	685	19	68	1 578
150	760	733	18	63	1 370
296	777	702	16	58	1 210
578	752	737	18	62	1 180

② 高温拉伸性能　14 mm厚板材高温拉伸性能见表7.2-385。

表7.2-385 Ti75钛合金14 mm厚板材不同温度下的拉伸性能

θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
100	703	673	18	72
200	590	540	20	78
300	525	463	22	78

续表7.2-385

θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
400	503	453	25	80
600	411	—	28	—
700	246	—	31	—
800	108	—	104	—
850	46	—	137	—

3）弹性性能　室温静态弹性模量$E=115$ GPa。

17.5 制造工艺和性能

采用常规方法制备Ti75合金的各种半成品。

1）热处理制度

① 普通退火　830～880℃，1～3 h，空冷+720～740℃，6～10 h，空冷。

② 真空退火　600～700℃，0.5～2 h，炉冷至200℃以下允许出炉空冷。炉内绝对压强应不大于6.66×10^{-2} Pa。

③ 去应力退火　去除零件冲压成形、焊接和机械加工时形成的内应力退火：520℃～560℃，0.5～2 h，空冷。去应力退火可以在空气炉或真空炉中进行。

2）焊接工艺和性能　合金厚板WIG焊接接头常规力学性能见表7.2-386。

表7.2-386 Ti75钛合金厚板焊接接头常规力学性能

状态	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	a_{KV}/kJ·m^{-2}	α/(°)
焊接接头	770	655	13	50	557	<90
接头+退火	742	650	17	51	727	>90

17.6 选材及应用

Ti75合金是为舰船动力装置二回路而研制的新型船用耐蚀钛合金，解决二回路现用材料的海水腐蚀问题。Ti75合金集中了多种钛合金的优点，即集中等强度、高的塑性、良好的易加工性和成型性、优异的耐蚀性、可焊性于一体，在舰船、海洋工程、化工工业等方面都有广泛的应用前景。

Ti75合金有各种可提高钛合金抗腐蚀合金元素，腐蚀性能与著名的耐蚀钛合金TA10（Ti-0.3Mo-0.8Ni）的耐蚀性相当，但强度高约40%～50%，因此，可做耐蚀结构材料使用，可用于既要求耐蚀性又要求强度的部位。该合金已用于某型号的动力装置中，有效提高所属装置的运行指数，降低维修费用。可在化工、氯碱等行业有广泛的应用前景。Ti75钛合金在民用行业中也将获得广泛应用，例如医用产品等。

18 Ti53311S钛合金

Ti53311S的名义成分为Ti-5Al-3Sn-3Zr-1Nb-1Mo-0.25Si，是多元合金化的近α型钛合金，含有α稳定元素Al，对α相起固溶强化的作用；含有β稳定元素Mo、Nb，强化β相并改善工艺塑性；含有中性稳定元素Sn、Zr、Si，提高合金的耐热性。Ti53311S钛合金名义成分的铝当量为6.9，钼当量为1.4，其主要性能特点是比工业纯钛和TC4合金高的使用强度和较好的工艺塑性。该合金还具有较好的与异种金属焊接的性能，能在高温下长时间工作。

Ti53311S钛合金适合于制造耐热零部件，已在航天工业中获得了重要应用。该合金的使用状态是单一退火状态或双

重退火（固溶时效）态；其主要半成品是各种规格的棒材（ϕ10～90 mm）和少量板材。

18.1　化学成分

Q/XB 1517—1998《卫星姿控发动机用Ti53311S钛合金棒材》规定的化学成分见表7.2-387。

表7.2-387　Ti53311S钛合金的化学成分（质量分数）

%

合金元素							杂质≤						
Ti	Al	Sn	Zr	Nb	Mo	Si	Fe	C	N	O	H	其他元素	
												单个	总和
基	4.5～6.2	3.0～4.0	2.0～3.5	0.5～1.5	0.5～1.5	0.15～0.35	0.15	0.10	0.05	0.15	0.015	0.10	0.40

18.2　物理及化学性能

1）熔化温度约1 650℃±50℃。

2）密度 ρ=（4.54±0.05）g/cm³。

3）热导率见表7.2-388。

表7.2-388　Ti53311S钛合金的热导率

θ/℃	96	202	301	401	453	505	553	604	651
λ/W·m⁻¹·K⁻¹	7.9	8.7	9.8	10.4	10.7	11.1	11.8	12.3	12.8

4）线胀系数见表7.2-389。

表7.2-389　Ti53311S钛合金的线胀系数

θ/℃	20～100	20～200	20～300	20～400	20～500	20～550	20～600
α/10⁻⁶K⁻¹	11.57	10.55	10.17	10.11	10.12	10.16	10.19

5）磁性能　无磁性。

6）抗氧化性能　可在550℃以下长期工作。

18.3　相变及显微组织

1）相变温度　$\alpha+\beta \leftrightarrow \beta$相转变温度为1 010℃±20℃。

2）显微组织　合金在平衡状态下以α相为主，并含有少量β相。当合金在$\alpha+\beta$相区加热并快速冷却时，得到α相和少量残余β相。当合金从β相区快速冷却时，得到α'马氏体相和少量过饱和β相。

3）再结晶温度约为850℃±50℃。

18.4　力学性能

1）各种温度下的常规力学性能

① 硬度　室温维氏硬度一般为380～420HV。

② 拉伸性能　合金的室、高温拉伸性能见表7.2-390。

2）高温蠕变性能　高温蠕变性能见表7.2-391。

表7.2-390　Ti53311S钛合金棒材在各种温度下的拉伸性能

规格/mm	状态	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
ϕ10～90	退火	20±10	980～1 200	880～1 150	5～18	8～40
		500±10	700～860	580～710	6～25	10～52
		550±10	650～780	500～670	8～25	12～59
		600±10	600～680	450～550	10～30	15～65

表7.2-391　Ti53311S钛合金棒材的550℃蠕变性能

规格/mm	θ/℃	σ/MPa	t/h	ε_r/%
ϕ10～90	550±10	200～300	100	0.084～0.388

18.5　制造工艺和性能

1）热处理工艺和性能

① 去应力退火　550～650℃，1～4 h，空冷。

② $\alpha+\beta$相区双重退火　940℃±30℃，1～2 h，空冷+590℃±30℃，5～12 h，空冷。

③ β相区双重退火　1 040℃±20℃，0.5～1.5 h，空冷+590℃±30℃，5～12 h，空冷。

2）热变形工艺和性能见表7.2-392。

表7.2-392　Ti53311S钛合金热变形工艺规范

锻造类型		加热温度/℃	终锻温度/℃	每火变形量/%
铸锭开坯		1 000～1 200	≥850	20～50
坯料后续热加工	>100 mm	900～1 050	≥850	30～60
	≤100 mm	900～1 000	≥800	40～70

3）冷加工工艺性能　可采用常规钛合金加工手段对该合金进行车、铣、刨、磨、锯等。

18.6　选材及应用

适用于航空、航天飞行器的耐热结构件选材。可经受50×10⁴次以上的热震疲劳试验。自1997年以来，它作为我国多种型号的卫星的某发动机喷注器用材，多次成功经受了高空环境的苛刻考验；并进一步应用于我国“神舟”系列飞船的相关部件上。

编写：王庆如（北京航空材料研究院）
魏寿庸（宝鸡有色金属加工厂）
何　瑜（宝鸡有色金属加工厂）
马济民（北京航空材料研究院）
张树启（西北有色金属研究院）
张　翥（北京有色金属研究院）
王金友（北京航空材料研究院）
王桂生（北京有色金属研究院）
陈　军（西北有色金属研究院）
赵永庆（西北有色金属研究院）
曲恒磊（西北有色金属研究院）

第 3 章　α-β 型钛合金

1　TC4（TC4ELI）钛合金

TC4（Ti-6Al-4V）钛合金是由美国于 1954 年研制成功的 Ti-Al-V 系 α-β 型钛合金，含有 6% 的 α 稳定元素 Al 和 4% 的 β 稳定元素 V。TC4 钛合金名义成分的铝当量为 7.0，钼当量为 2.9，退火状态含 10% ~ 15%β 相 Al 在 Ti-Al-V 系中通过固溶强化 α 相提高合金的室温强度和热强性能，而 V 是钛合金中既提高强度又改善塑性的少数合金元素之一。V 对钛合金塑性的有利影响，是因为它不像大多数合金元素那样增大 α 钛晶格 c/a 轴的比值，而是减小该比值，从而提高 α 相的塑性变形能力。此外，V 还能抑制 α_2 超结构相的形成，避免在长时间使用过程中出现合金脆化。

TC4 钛合金的主要特点是优异的综合性能和良好的工艺特性。TC4 钛合金具有中等的室温和高温强度，良好的蠕变抗力和热稳定性，较高的疲劳性能和海水中的裂纹扩展抗力，以及满意的断裂韧性和热盐应力腐蚀性能，对氢的敏感性也比 TC2、TC1 合金为小，适合与制造从 -196 ~ 450℃ 广阔温度范围内工作的各种零件，特别是采用损伤容限原则设计的零部件。TC4 钛合金还具有优良的工艺塑性和超塑性，适合于用各种压力加工方法进行成形，并采用各种方式进行焊接和机械加工。

TC4 钛合金的主要半成品形式是棒材、锻件、薄板、厚板、型材和丝材等，也可用于铸件（ZTC4）。该合金主要在退火状态下使用，也可以采用固溶时效处理进行一定程度的强化，然而淬透截面一般不超过 25 ~ 30 mm。作为一个多用途材料，TC4 钛合金在航空航天工业和各民用行业都获得了广泛的推广应用。全世界 Ti-6Al-4V 合金半成品的产量占各种钛合金半成品总产量的一半以上，在航空航天工业中超过 80%。所以 TC4 钛合金的研究工作、组织性能分析，生产和使用经验最为充分。在讨论钛合金的技术时常常把 TC4 作为钛合金的典型代表，例如，比强度高，抗氧化，耐腐蚀，耐低温……。目前，针对不同的使用条件和工艺要求，各国都出现了许多 Ti-6Al-4V 钛合金的改型，其主要区别是不同的 Al、V 含量和较低的间隙元素杂质含量。

1）材料牌号　TC4。

2）相近牌号　Ti-6Al-4V，Ti-6Al-4V ELI，Ti-6Al-4V SP，Ti-6Al-4V ELI SP（美国）；

BT-6，BT-6C，BT-6Ч，BT-6Г，BT-6K，BT-6KT（俄罗斯）；

IMI-318，IMI-318ELI（英国）；

TiAl6V4（德国）；T-A6V（法国）；SAT-64（日本）。

1.1　化学成分

GB/T 3620.1—1994《钛及钛合金牌号和化学成分》规定的化学成分见表 7.3-1。

表 7.3-1　TC4 钛合金化学成分（质量分数）%

合金牌号	合金元素			杂质≤					其他元素	
	Al	V	Ti	Fe	C	N	H	O	单个	总和
TC4	5.5 ~ 6.8	3.5 ~ 4.5	余量	0.30	0.10	0.05	0.015	0.20	0.10	0.40

注：产品出厂时供方可不检验其他元素，用户要求并在合同中注明时可予以检验。

1.2　物理及化学性能

1）密度 $\rho = 4.44\ g/cm^3$。

2）熔化温度 1 630 ~ 1 650℃。

3）热导率见表 7.3-2。

表 7.3-2　TC4 钛合金热导率

θ/℃	20	100	200	300	400	500
$\lambda/W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	6.8	7.4	8.7	9.8	10.3	11.8

4）比热容见表 7.3-3。

表 7.3-3　TC4 钛合金比热容

θ/℃	20	100	200	300	400	500
$c/J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$	611	624	653	674	691	703

5）线胀系数见表 7.3-4。

表 7.3-4　TC4 钛合金线胀系数

θ/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400	20 ~ 500	20 ~ 600
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	9.1	9.2	9.3	9.5	9.7	10.0

6）电阻率见表 7.3-5。

表 7.3-5　TC4 钛合金电阻率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	550	600	700	800
$\rho/\mu\Omega\cdot m$	1.70	1.76	1.82	1.86	1.89	1.91	1.92	1.92	1.92	1.91

7）磁性能　无磁性。在 1 592 A/m 磁场强度条件下的磁导率 $\mu = 1.000\ 05$ H/m。

8）抗氧化性能　TC4 钛合金在 430℃ 以下长时间加热，形成很薄而且具有保护性的氧化膜。随着加热温度的升高，氧化膜增厚，同时其保护性变差。合金在 700℃ 加热 2 h 后，氧化膜厚度达到 25 μm。在 800℃ 以上的温度加热形成疏松的氧化层。在 1 000℃ 加热 1 h 后，氧化层的厚度达到 0.65 mm。

9）耐腐蚀性能

① TC4 接触腐蚀性能见表 7.3-6。

表 7.3-6　TC4 钛合金与结构钢和铝合金的接触腐蚀性能

试验条件			接触偶		
介质	θ/℃	时间	材料	表面状态	强度损失/%
3.5%NaCl 水溶液	35	5 个月	30CrMnSiA	无防护涂层	92.2
				氰化镀锌钝化	10.2
				氰化镀锌钝化并涂 H61-1 耐热漆	1.4
			30CrMnSiNi2A	喷砂磷化	13.8
				喷砂磷化并涂 H61-1 耐热漆	0
		12 个月	LY12CZ	无防护涂层	29.6
				阳极化并涂 H06-2 漆	2.4
				涂 XM-220 密封漆	2.6

② 热盐应力腐蚀性能见表 7.3-7。

表 7.3-7　TC4 钛合金热盐应力腐蚀性能

试验条件			盐脆标准	盐脆应力
盐浓度/mg·cm^{-2}	θ/℃	t/h	$(\varphi_0-\varphi)/\varphi_0$/%	σ/MPa
0.1	250	100	≥25	677
	300	100	≥25	628
	350	100	≥25	363
	350	200	≥25	343
	400	100	≥25	216

1.3　相变及显微组织

1）相变

① 相转变温度　α+β↔β 转变温度为 995℃±15℃和 975℃±15℃（ELI）。

② 时间-温度-组织转变曲线见图 7.3-1。

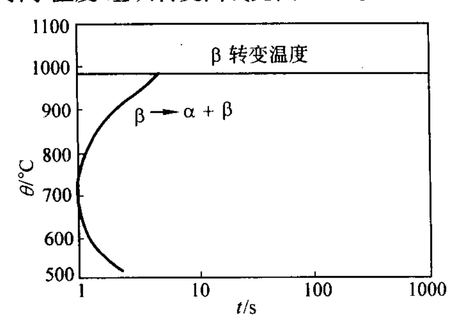


图 7.3-1　TC4 钛合金的时间-温度-组织转变曲线

③ 再结晶转变温度　开始：850℃；结束：950℃。

2）显微组织

① Ti-Al-V 三元系中 Al 含量为 6%的垂直截面及 TC4 钛合金在图中的位置示于图 7.3-2。

TC4 钛合金在室温平衡状态下由 α 和 β 相组成，β 相的含量一般为 8%～10%。

② 当 TC4 钛合金从 β 相区快速冷却时，得到过饱和的马氏体 α′相。从 α+β 相区上部快速冷却时得到初生 α 相和 α′

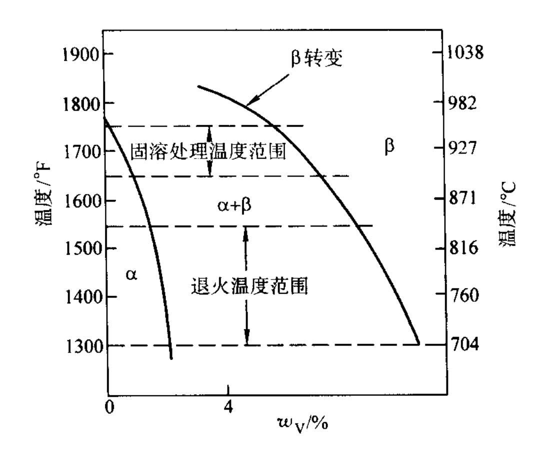


图 7.3-2　Ti-Al-V 三元系中 Al 含量为 6%的垂直截面图和锻造或热处理后的组织

相，并伴有少量亚稳定的保留 β 相。从 α+β 相区马氏体转变开始温度（Ms）以下（如 900℃）快速冷却时，得到初生 α 相+α′相和保留 β 相。在更低温度（如 840℃）下快冷时，得到初生 α 相和亚稳定 β 相时效过程中，上述的 α′和保留 β 相都分解成 α+β 相。

③ 当 TC4 钛合金从 α+β 相区上部在空气中冷却时得到初生 α 相、片状次生 α 相和少量保留 β 相（片状次生 α 相和保留 β 相的混合体通常称为转变 β 组织）。经过 α+β 相区上部热变形的 TC4 钛合金半成品通常具有这种显微组织，其特点是在转变 β 组织基体上分布着一定数量的初生 α 相。这种显微组织经常称为双态组织，它具有较好的综合力学性能。

④ 初生 α 相含量对 TC4 钛合金的力学性能有明显的影响。一般讲，初生 α 相含量较多时，室温拉伸塑性和疲劳性能较好；初生 α 相数量较少时，高温持久、蠕变性能和断裂韧度较好。为了获得优异的综合力学性能，初生 α 相含量通常希望控制在 15%～50%范围内。初生 α 相含量超过这个范围时，允许在正常退火之前增加一次高温固溶处理，即在 β 转变温度以下 30～60℃保温 1 h，随后空冷或水冷。

1.4　力学性能

1）技术标准规定的性能见表 7.3-8。

表 7.3-8　技术标准规定的 TC4 钛合金性能

技术标准	品种	状态	δ 或 d /mm	取样方向	室温						400℃	
					σ_b/MPa	τ_{p02} /MPa	δ_5 /%	φ /%	a_{KU} /kJ·m^{-2}	α /(°)	σ_b /MPa	σ_{100} /MPa
						≥						
GB/T 3621—1994	板材	退火	0.8～2.0	LT	≥895	830	12	—	—	35	590	540
			2.1～5.0		≥895	830	10	—	—	30	590	540
			5.1～10.0		≥895	830	10	—	—	—	590	540
GJB 2505—1995	板材（带材）	退火	0.8～4.0	LT（L）	925～1 150	870	12	—	—	35	590	540
			4.1～5.0		925～1 150	870	10	—	—	30	590	540
			5.1～10.0		895～1 100	825	10	—	—	—	590	540
			10.1～25.0		895～1 100	825	9	—	—	—	590	540
GJB 2921—1997	板材	退火	0.5～3.0	LT	≥925	870	12	—	—	35	590	540
			3.1～4.0		≥925	870	10	—	—	30	590	540
GB/T 3623—1998	丝材①	退火	1.6～7.0	L	≥895	—	10②	—	—	—	—	—
GB/T 2956—1996	棒材	退火	8～90	L	≥895	825	10	25	400	—	620	570
GJB 493—1988	棒材	退火	≤50	L	≥930	860	10	25	400	—	590	570
			51～70		≥895	825	10	25	400	—	590	570

续表 7.3-8

技术标准	品种	状态	δ 或 d /mm	取样方向	室温 σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	φ /%	a_{KU} /kJ·m^{-2}	α /(°)	400℃ σ_b /MPa	σ_{100} /MPa
						≥						
GB/T 1538—1992	棒材	退火	21~50	L	≥930	860	10	25	—	—	615	570
			>50~75	L	≥895	825	10	25	—	—	615	570
			>75~100	L	≥895	825	10	25	345	—	615	570
				LT	≥895	825	95	20	—	—	—	—
			>100~150	L	≥895	825	10	25	295	—	600	560
				LT	≥895	825	9	20	—	—	—	—
			>150~220	L	≥895	825	10	20	—	—	—	—
				LT	≥895	825	8	18	—	—	—	—
GJB 2218—1994	棒材	退火	21~100	L	≥895	825	10	25	—	—	—	—
			>100~150	C	≥895	825	9	20	—	—	—	—
			>150~220	C	≥895	825	8	15	—	—	—	—
	饼坯、环坯	退火	δ38~110	C	≥895	825	10	25	—	—	—	—
GJB 2219—1994	棒（线）材	固溶时效	4.0~14.0	L	≥1 100	1 000	10	20	—	—	—	—
GB/T 16598—1996	饼坯、锻件	退火	$s\leqslant100$ cm^2	C	≥895	825	10	25	—	—	—	—
GJB/T 2220—1994	饼坯、环坯	退火	δ38~110 $m\leqslant60$ kg	C	≥895	825	10	25	—	—	615	570
GJB 2744—1996	自由锻件、模锻件	退火	$M\leqslant60$ kg	L③	≥895	825	10	25	350	—	600④	560
HB 5224—1982	盘模锻件	退火	$M\leqslant60$ kg	C	≥890	825	10	30	345	—	620	570
			$m\leqslant60$~120 kg	C	≥890	825	8	25	345	—	590	550
HB 5432—1989	飞机锻件	退火	δ≤150	L	≥895	825	10	30	350	—	600	560
				LT	≥895	825	10	25	—	—	—	—
				ST	≥895	825	8	20	—	—	—	—
			δ≤50⑤	L	≥930	860	10	30	350	—	600	560
				LT	≥930	860	10	25	—	—	—	—
HB 7238—1995	环形锻件	退火	$m\leqslant60$ kg	C	≥895	825	10	25	345	—	615	570

注：1. GB/T 3621—1994 和 GJB 2505—1995 规定 500℃的 $\sigma_b\geqslant440$ MPa，$\sigma_{100}\geqslant195$ MPa。

2. GJB 493—1988、GJB 2220—1994、GJB2744—1996、HB 5224—1982、HB 5432—1989 和 HB 7238—1995 规定室温 HBS $d\geqslant3.35$ mm。

3. GJB 1538—1992 和 HB 5432—1989 规定在 1 170 MPa 轴向应力下进行缺口试样的室温应力断裂试验，持续时间应≥5 h。

4. GIB 2219—1994 规定，直经小于 7 mm 棒（线）材的室温 δ_5 和 φ 值报实测数据。

5. GJB 2219—1994 规定室温 $\tau\geqslant690$ MPa。

6. GJB 1538—1992 和 HB 5432—1989 规定室温 L-R 取向 $K_{IC}\geqslant50$ MPa·m$^{1/2}$。

① 焊丝不检验力学性能。

② 试样尺寸规定为：$d<4$ mm，$L_0=50$ mm；$d>4$ mm，$L_0=4d_0$。

③ 采用横向或短横向试样测得的室温 δ_5 和 φ 值允许比规定的纵向值低 20%。

④ 规定 400℃的 $\delta_5\geqslant12\%$，$\varphi\geqslant40\%$。

⑤ HB 5432—1989 规定，当需方有要求时对于两平行面间距 $\delta\leqslant50$ mm 的锻件，σ_b 和 $\sigma_{p0.2}$ 可以分别提高到 930 MPa 和 860 MPa。

2）各种温度下的力学性能

① 硬度 退火状态的室温硬度 HBS = 255~341；固溶时效状态的室温硬度 HBS = 293~361。

② 拉伸性能 各种温度下的拉伸性能见表 7.3-9。

表 7.3-9 TC4 钛合金各种温度下的拉伸性能

品种	d /mm	状态	取样方向	θ /℃	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	$\sigma_{p0.1}$ MPa	δ_5 /%	φ /%
棒材	20	退火	L	-55	1 059	—	—	16.8	39.1
				-30	1 020	—	—	17.7	44.5
				20	967	860	836	16.2	44.1
				100	846	736	695	15.4	49.3
				200	741	613	578	17.4	54.8

续表 7.3-9

品种	d /mm	状态	取样方向	θ /℃	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	$\sigma_{p0.1}$ MPa	δ_5 /%	φ /%
棒材	20	退火	L	300	690	543	501	17.0	58.9
				350	665	532	498	16.1	58.1
				400	645	508	474	17.3	60.1
				500	583	401	350	26.5	78.1
				600	413	212	178	47.9	93.8
				700	245	89	72	118.0	99.0

取样方向对拉伸性能的影响见表 7.3-10。

棒材的拉伸应力-应变曲线见图 7.3-3。

表 7.3-10 取样方向对 TC4 钛合金拉伸性能的影响

品种	$d\times\delta$ /mm	状态	取样方向	θ /℃	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	φ /%
饼坯	400×80	退火	C	20	940	887	14.7	35.5
				100	863	812	13.4	44.3
				200	743	668	15.4	55.0
				300	667	559	15.5	50.6
				400	633	508	15.4	55.4
			R	20	922	873	14.6	32.3
				100	847	788	11.2	35.2
				200	742	666	15.6	48.9
				300	661	560	16.9	52.4
				400	652	471	15.2	53.1

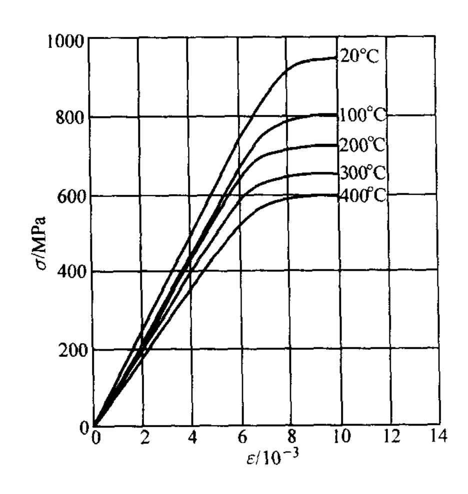


图 7.3-3 TC4 钛合金棒材的拉伸应力-应变曲线

③ 压缩性能 室温压缩屈服强度见表 7.3-11。

表 7.3-11 TC4 钛合金室温压缩屈服强度

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	$\sigma_{pc0.2}$/MPa
棒材	18	退火	L	20	969

室温压缩应力-应变曲线见图 7.3-4。

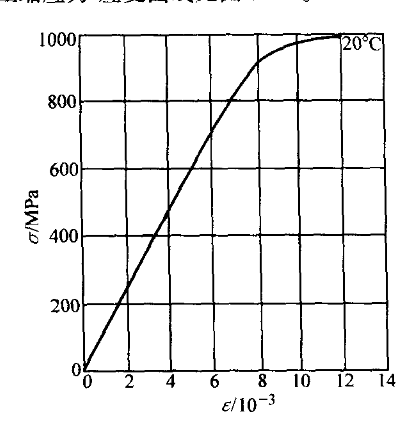


图 7.3-4 TC4 钛合金棒材的室温压缩应力-应变曲线

④ 冲击性能 室温冲击韧度见表 7.3-12。
各种温度下的冲击韧性见表 7.3-13。
⑤ 弯曲性能 室温弯曲角见表 7.3-14。

表 7.3-12 TC4 钛合金室温冲击韧性

品种	状态	δ 或 d/mm	取样方向	a_{Ku}/kJ·m^{-2}
棒材	退火	≤60	L	554
		>60~150	L	513
飞机锻件	退火	$\delta\leqslant150$	L	540
盘模锻件	退火	$m\leqslant120$ kg	C	513

表 7.3-13 TC4 钛合金各种温度下的冲击韧性

品种	d/mm	状态	θ/℃	a_{Ku}/kJ·m^{-2}	θ/℃	a_{Ku}/kJ·m^{-2}
棒材	20	退火	-70	432	400	1 550
			-40	484	450	1 790
			-20	477	500	1 850
			20	460	600	1 910
			150	668	700	2 110
			250	1 090	800	2 640
			350	1 390		

表 7.3-14 TC4 钛合金室温弯曲角

品种	状态	δ/mm	取样方向	α ($D=3\delta$) / (°)
板材	退火	0.8	T	>50
		1.6	T	>50
		2~10	T	35.3

⑥ 扭转与剪切性能 扭转性能见表 7.3-15。

表 7.3-15 TC4 钛合金扭转性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	τ_b /MPa	$\tau_{p0.3}$ /MPa	$\tau_{p0.01}$ /MPa	扭转角 / (°)
棒材	24	退火	L	20	880	600	531	1 245
				100	776	557	493	1 100
				200	722	482	426	—
				300	672	434	385	—
				350	649	404	355	—
				400	611	380	320	—

剪切性能见表 7.3-16。

表 7.3-16 TC4 钛合金剪切性能

品种	棒材					
d/mm	24					
状态	退火					
θ/℃	20	100	200	300	350	400
τ/MPa	656	582	543	510	427	410

⑦ 承载性能见表 7.3-17。

表 7.3-17 TC4 钛合金承载性能

品种	d /mm	状态	取样方向	θ /℃	e/D	σ_{bru}/MPa		σ_{bry}/MPa	
						A	B	A	B
棒材	12.7~25.4	退火	L	20	1.5	1 386	1 462	1 220	1 310
				20	2.0	1 744	1 834	1 427	1 517
	>25.4~50.8	退火	L	20	1.5	1 379	1 441	1 220	1 282
				20	2.0	1 731	1 806	1 427	1 482

⑧ 应力集中见表 7.3-18。

表 7.3-18 TC4 钛合金应力集中

品种	d 或 δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_{bH}/MPa				σ_{bH}/σ_b			
					$K_t=2$	$K_t=3$	$K_t=4$	$K_t=5$	$K_t=2$	$K_t=3$	$K_t=4$	$K_t=5$
棒材	20	退火	L	-70	—	1 815	—	—	—	1.53	—	—
				-40	—	1 722	—	—	—	1.52	—	—
				-20	—	1 663	—	—	—	1.50	—	—
				20	1 548	1 599	1 619	1 545	1.55	1.60	1.62	1.54
				150	—	1 306	—	—	—	1.51	—	—
				250	—	1 146	—	—	—	1.47	—	—
				350	—	1 063	—	—	—	1.50	—	—
				450	—	976	—	—	—	1.50	—	—

⑨ 热稳定性 试样热暴露后的室温拉伸性能见表 7.3-19。

表 7.3-19 TC4 钛合金试样热暴露后的室温拉伸性能

品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	热暴露条件		σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	Ψ /%
				θ/℃	t/h				
棒材	20	退火	L	未暴露		1 000	—	16.8	41.5
				350	100	1 029	948	14.8	39.5
					500	1 021	944	15.9	42.4
					1 000	1 029	941	14.9	42.9
				400	100	999	911	14.7	42.0
					500	989	918	15.1	42.2
					1 000	988	916	15.4	39.9
				450	100	987	917	16.4	42.6

试样应力热暴露后的室温拉伸性能见表 7.3-20。

表 7.3-20 TC4 钛合金试样应力热暴露后的室温拉伸性能

品种	d /mm	状态	取样方向	热暴露条件			σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	Ψ /%
				θ/℃	σ/MPa	t/h				
棒材	20	退火	L	未暴露			1 012	944	15.9	44.0
				300	510	100	1 005	939	11.2	43.3
					530	100	1 046	967	11.2	41.8
					579	100	1 033	987	11.4	43.0
				350	392	100	1 028	—	11.4	44.3
					471	100	1 031	—	10.7	43.6
				400	177	100	1 040	—	10.9	42.2
					235	100	996	—	10.6	46.2
					275	100	978	—	10.4	47.8
					314	100	992	—	10.1	50.2

3）持久和蠕变性能

① 高温持久性能见表 7.3-21。

表 7.3-21 TC4 钛合金高温持久性能

品种	d 或 δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_{100}/MPa	σ_{100H}/MPa
棒材	22	退火	L	250	735	—
				300	686	686
				350	657	657
				400	588	608

② 高温蠕变性能见表 7.3-22。

表 7.3-22 TC4 钛合金高温蠕变性能

品种	d 或 δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	$\sigma_{0.1/100}$/MPa	$\sigma_{0.2/100}$/MPa
棒材	20	退火	L	300	530	579
				350	392	471
				400	177	235

4）疲劳性能

① 高周疲劳 旋转弯曲疲劳极限见表 7.3-23。

表 7.3-23 TC4 钛合金旋转弯曲疲劳极限

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	N/周	σ_D/MPa
棒材	24	退火	L	20	1	-1	2×10^7	481
					1.72	-1	2×10^7	275
				200	1	-1	2×10^7	432
					1.72	-1	2×10^7	265
				300	1	-1	2×10^7	422
					1.72	-1	2×10^7	235
				400	1	-1	2×10^7	412
					1.72	-1	2×10^7	206

室温轴向加载疲劳极限见表 7.3-24。

表 7.3-24 TC4 钛合金室温轴向加载疲劳极限

品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	K_t	R	f/Hz	N/周	σ_D/MPa
棒材	18	退火	L	1	0.5	130	10^6	760
							10^7	714
				1	0.1	130	10^6	546
							10^7	539
				1	-1	130	10^6	363
							10^7	345
				3	0.5	130	10^6	374
							10^7	370
				3	0.1	130	10^6	264
							10^7	258
				3	-1	130	10^6	148
							10^7	148
				5	0.5	130	10^6	186
							10^7	172
				5	0.1	130	10^6	127
							10^7	108
				5	-1	130	10^6	72
							10^7	68

棒材光滑试样（$K_t=1$）室温轴向加载疲劳 S-N 曲线见图 7.3-5。

棒材缺口试样（$K_t=3$）室温轴向加载疲劳 S-N 曲线见图 7.3-6。

棒材缺口试样（$K_t=5$）室温轴向加载疲劳 S-N 曲线见图 7.3-7。

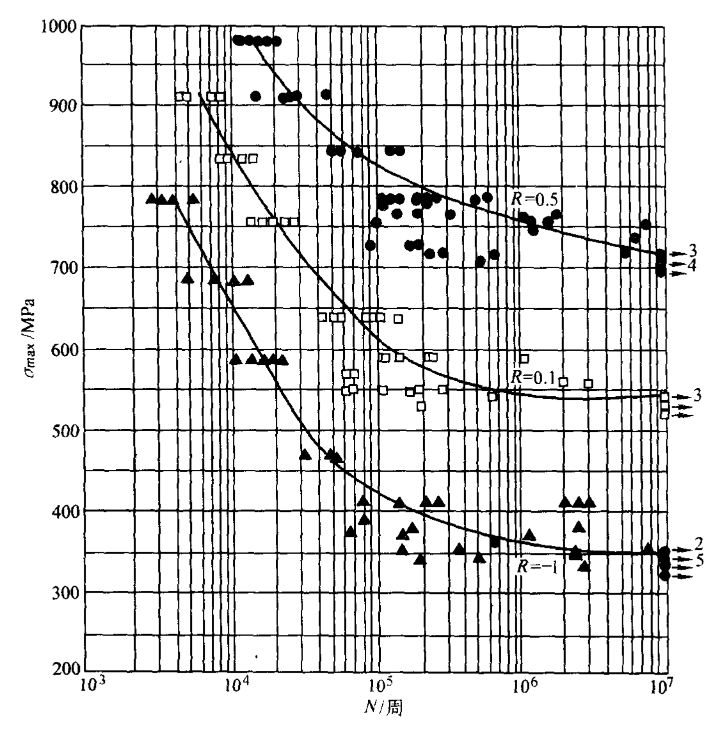


图 7.3-5　TC4 钛合金棒材光滑试样（$K_t=1$）室温轴向加载疲劳 S-N 曲线

材料品种：棒材
材料规格：ϕ18 mm
热处理状态：800℃，1 h，空冷
材料强度：$\sigma_b=973$ MPa，$\sigma_{p0.2}=939$ MPa
取样方向：L
试样尺寸：$d=5$ mm
加载方式：轴向
应力比：0.5，0.1，-1
试验频率：10，130 Hz
试验环境：20℃，空气
炉批数：1
试样数：167
等效应力方程：$\lg N=16.64-4.76\lg(\sigma_{eq}-346)$
$\sigma_{eq}=\sigma_{max}(1-R)^{0.45}$

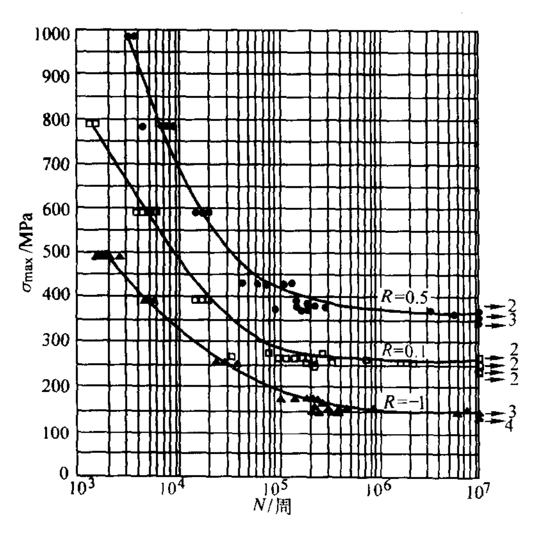


图 7.3-6　TC4 钛合金棒材缺口试样（$K_t=3$）室温轴向加载疲劳 S-N 曲线

材料品种：棒材
热处理状态：800℃，1 h，空冷
材料强度：$\sigma_b=973$ MPa，$\sigma_{p0.2}=939$ MPa
取样方向：L
试样尺寸：$d=5$ mm
加载方式：轴向
应力比：0.5，0.1，-1
试验频率：10，130 Hz
试验环境：20℃，空气
炉批数：1
试样数：137
材料规格：ϕ18 mm
等效应力方程：$\lg N=13.55-3.84\lg(\sigma_{eq}-148)$
$\sigma_{eq}=\sigma_{max}(1-R)^{0.6}$

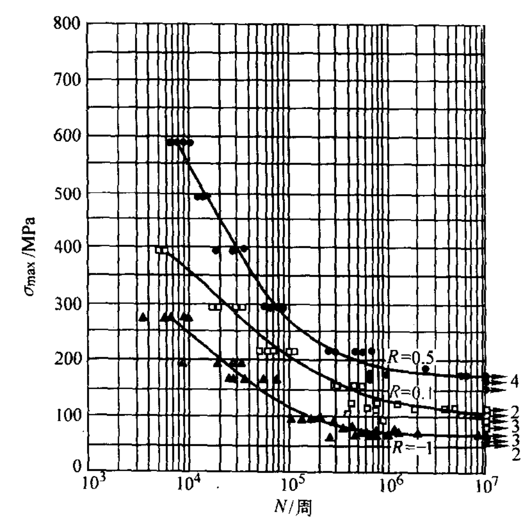


图 7.3-7　TC4 钛合金棒材缺口试样（$K_t=5$）室温轴向加载疲劳 S-N 曲线

材料品种：棒材
材料规格：ϕ18 mm
热处理状态：800℃，1 h，空冷
材料强度：$\sigma_b=973$ MPa，$\sigma_{p0.2}=939$ MPa
取样方向：L
试样尺寸：$d=5$ mm
应力比：0.5，0.1，-1
试验频率：10，130 Hz
试验环境：20℃，空气
炉批数：1
试样数：137
加载方式：轴向
等效应力方程：$\lg N=13.55-3.84\lg(\sigma_{eq}-148)$
$\sigma_{eq}=\sigma_{max}(1-R)^{0.6}$

② 低周疲劳 棒材的应力控制低周疲劳性能见表7.3-25。

表7.3-25 TC4钛合金棒材的应力控制低周疲劳性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	f/Hz	K	σ_{max}/MPa	N/周
棒材	20	退火	L	20	2.4	0.1	0.17	0.7	837	2 641
								0.5	598	9 090
								0.3	359	88 497
	24	退火	L	200	2.25	0.1	0.17	0.7	704	3 654
								0.5	503	8 901
								0.3	302	102 025
				300	2.25	0.1	0.17	0.7	645	3 278
								0.5	461	8 944
								0.3	277	102 343

棒材室温应变控制低周疲劳数据及ε-N曲线见表7.3-26和图7.3-8。

表7.3-26 TC4钛合金棒材室温应变控制低周疲劳数据

材料品种	棒材	试样尺寸	d = 6 mm
材料规格	d = 18 mm	加载波形	三角波
取样方向	L	应变比	-1
试验温度	20℃	试验频率	0.167~0.333 Hz
控制方法	轴向应变	失效判据	断裂

续表7.3-26

热处理状态	800℃，1 h，空冷					
稳态迟滞回线特征值				2N_f/周	试样数量/根	
$\Delta\varepsilon_t/2$	$\Delta\varepsilon_e/2$	$\Delta\varepsilon_p/2$	$\Delta\sigma/2$ /MPa			
%						
4.284	0.920	3.364	1 092	95	3	
3.887	0.896	2.991	1 064	113	4	
3.288	0.874	2.414	1 037	143	3	
2.286	0.847	1.439	1 005	294	3	
1.295	0.862	0.433	1 022	765	4	
1.078	0.806	0.272	957	1 443	4	
0.868	0.785	0.083	932	2 720	4	
0.580	0.562	0.018	666	29 482	3	
应变疲劳参数	σ'_f，MPa	b	ε'_f，%	C	K'，MPa	n'
	1 564	-0.07	269	-0.96	1 420	0.07
曲线的数学表达式	$\Delta\varepsilon_t/2 = 0.013\ (2N_f)^{-0.07} + 2.69\ (2N_f)^{-0.96}$					
	$\Delta\sigma/2 = 1\ 420\ (\Delta\varepsilon_p/2)^{0.07}$					

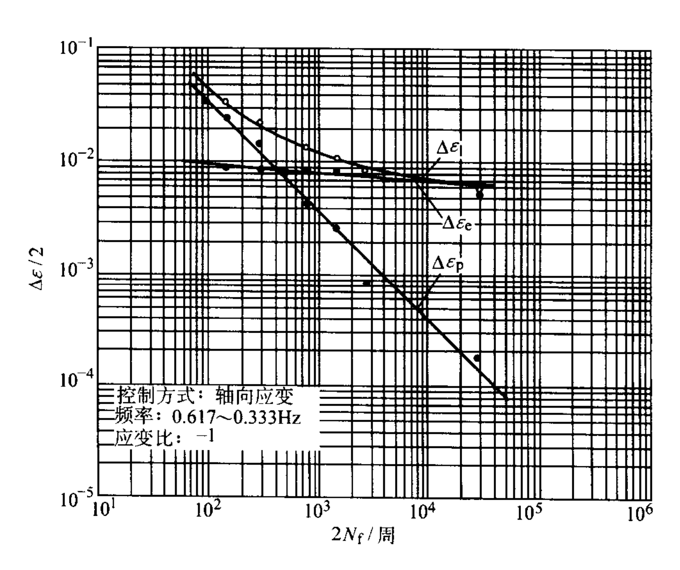


图7.3-8 TC4钛合金棒材室温低周疲劳ε-N曲线

棒材350℃应变控制低周疲劳数据及ε-N曲线见表7.3-27和图7.3-9。

表7.3-27 TC4钛合金棒材350℃应变控制低周疲劳数据

材料品种	棒材		试样尺寸	d = 6 mm	
材料规格	d = 18 mm		加载波形	三角波	
取样方向	L		应变比	-1	
试验温度	350℃		试验频率	0.167~0.333 Hz	
控制方法	轴向应变		失效判据	断裂	
热处理状态	800℃，1 h，空冷				
稳态迟滞回线特征值				2N_f/周	试样数量/根
$\Delta\varepsilon_t/2$	$\Delta\varepsilon_e/2$	$\Delta\varepsilon_p/2$	$\Delta\sigma/2$ /MPa		
%					
4.160	0.816	3.344	759	81	3
3.198	0.827	2.371	769	118	4

续表7.3-27

稳态迟滞回线特征值				2N_f/周	试样数量/根	
$\Delta\varepsilon_t/2$	$\Delta\varepsilon_e/2$	$\Delta\varepsilon_p/2$	$\Delta\sigma/2$ /MPa			
%						
2.237	0.843	1.394	781	229	3	
1.831	0.824	1.007	766	363	3	
1.221	0.777	0.444	722	830	3	
0.902	0.696	0.206	647	2 176	3	
0.682	0.617	0.065	574	5 681	5	
0.572	0.597	—	555	8 872	4	
应变疲劳参数	σ'_f，MPa	b	ε'_f，%	C	K'，MPa	n'
	1 128	-0.07	189	-0.91	1 046	0.08
曲线的数学表达式	$\Delta\varepsilon_t/2 = 0.012\ (2N_f)^{-0.07} + 1.89\ (2N_f)^{-0.91}$					
	$\Delta\sigma/2 = 1\ 046\ (\Delta\varepsilon_p/2)^{0.08}$					

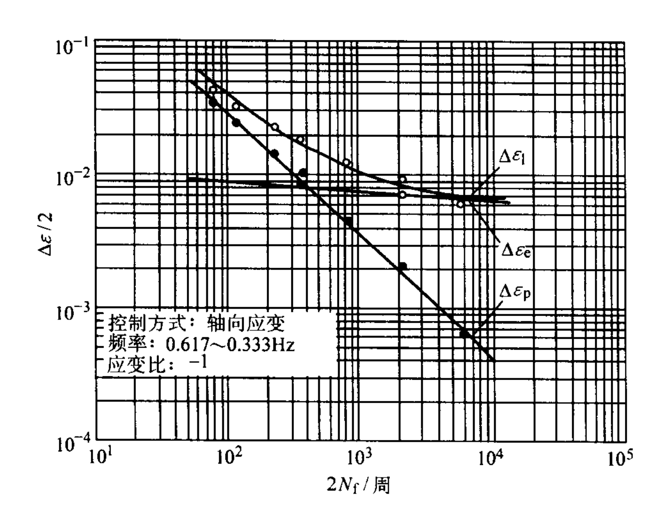


图7.3-9　TC4钛合金棒材350℃低周疲劳 ε-N 曲线

棒材不同温度的循环应力-应变曲线见图7.3-10。

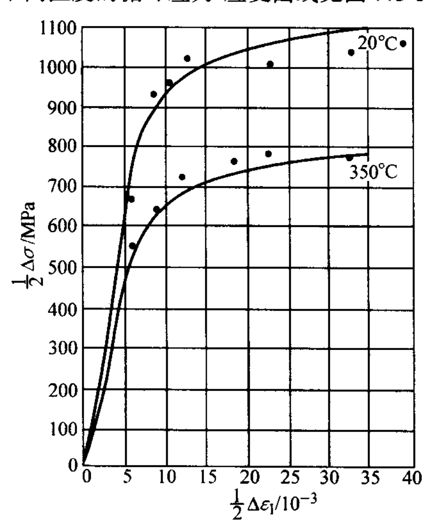


图7.3-10　TC4钛合金棒材不同温度的循环应力-应变曲线

5）弹性性能

① 静态和动态弹性模量见表7.3-28。

表7.3-28　TC4钛合金静态和动态弹性模量

品种	棒材									
d/mm	20									
状态	退火									
取样方向	L									
θ/℃	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450
E/GPa	109	—	—	97	—	91	—	85	—	75
E_D/GPa	112	111	110	107	104	102	98	95	92	—

② 切变模量见表7.3-29。

表7.3-29　TC4钛合金切变模量

品种	棒材						
d/mm	20						
状态	退火						
取样方向	L						
θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
G/GPa	44	43	41	38	36	34	32

③ 泊松比见表7.3-30。

表7.3-30　TC4钛合金泊松比

品种	棒材						
d/mm	20						
状态	退火						
取样方向	L						
θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
μ	0.34	0.34	0.34	0.35	0.37	0.37	0.39

6）断裂性能

① 室温断裂韧度见表7.3-31。

表7.3-31　TC4钛合金室温断裂韧度

品种	规格/mm	状态	试样类型	取样方向	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$
棒材	70×70	退火	三点弯曲	L-T	83.3
锻坯	40×75	退火	三点弯曲	L-T	73.1
	30×104	退火	CT	L-T	64.9
	25×60			T-L	74.8
模锻件	δ50	退火	CT	L-T	78.3
				T-L	73.5

② 应力腐蚀断裂韧度见表7.3-32。

表7.3-32　TC4钛合金应力腐蚀断裂韧度

品种	规格/mm	状态	试样类型	取样方向	θ/℃	环境条件	K_{ISCC}/MPa·m$^{1/2}$	K_{ISCC}/K_{IC}
锻坯	30×210	退火	悬臂弯曲	L-T	35	3.5%NaCl	59.5	77%
			悬臂弯曲	T-L	35	3.5%NaCl	42.2	—

③ 疲劳裂纹扩展速率　锻坯L-T试样室温空气环境 $da/dN-\Delta K$ 曲线见图7.3-11。

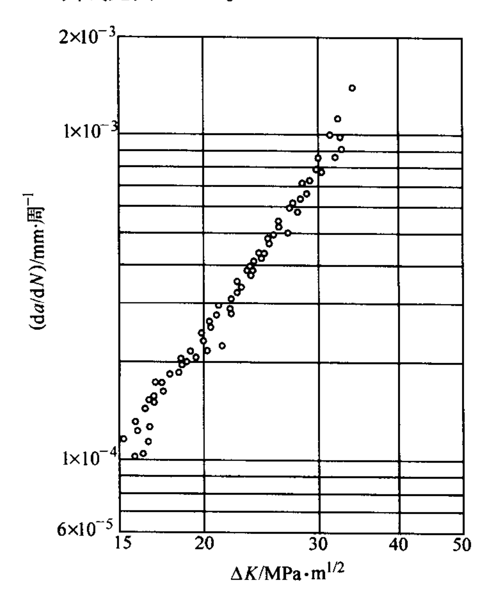


图7.3-11　TC4钛合金锻坯的L-T试样室温空气环境 $da/dN-\Delta K$ 曲线

材料品种：锻坯　　试验频率：13.3 Hz
材料规格：δ25 mm　　试验环境：20℃，空气
热处理状态：800℃，1 h，空冷　　试样个数：3
材料强度：σ_b=943 MPa，$\sigma_{p0.2}$=905 MPa　　试验点数：67
试样类型：CT　B=20 mm，W=80 mm　　拟合公式：$da/dN=C(\Delta K)^n$
加载方式：轴向　　$C=5.01\times10^{-8}$
应力比：R=0.1　　n=2.84

模锻件L-T试样室温空气环境 $da/dN-\Delta K$ 曲线见图7.3-12。

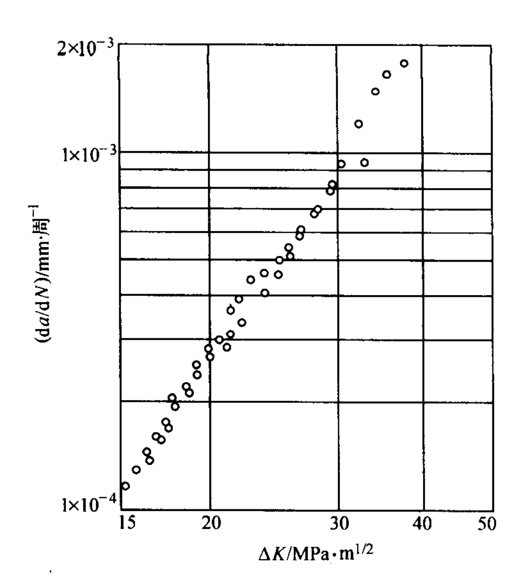


图7.3-12 TC4钛合金模锻件的L-T试样室温空气环境 $da/dN-\Delta K$ 曲线

材料品种：模锻件	试验频率：13.3 Hz
热处理状态：800℃，1 h，空冷	试验环境：20℃，空气
材料强度：$\sigma_b=966$ MPa，$\sigma_{p0.2}=902$ MPa	试样个数：2
试样类型：CT $B=20$ mm，$W=80$ mm	试验点数：41
加载方式：轴向	拟合公式：$da/dN=C\ (\Delta K)^n$
应力比：$R=0.1$	$C=5.25\times10^{-8}$
	$n=2.85$

锻坯L-T试样腐蚀环境 $da/dN-\Delta K$ 曲线见图7.3-13。

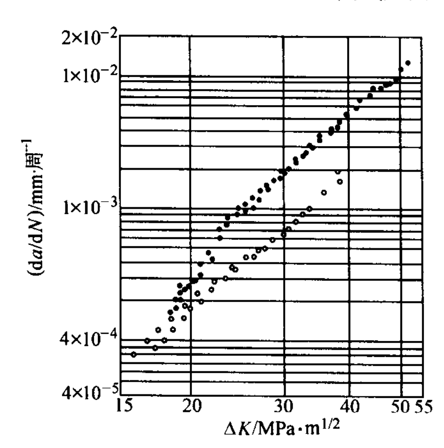


图7.3-13 TC4钛合金锻坯的L-T试样5%NaCl环境 $da/dN-\Delta K$ 曲线

• 试验点	◦ 试验点
材料品种：锻坯	材料品种：锻坯
材料规格：δ30 mm	材料规格：δ25 mm
热处理状态：800℃，1 h，空冷	热处理状态：800℃，1 h，空冷
材料强度：$\sigma_b=943$ MPa，$\sigma_{p0.2}=903$ MPa	材料强度：$\sigma_b=943$ MPa，$\sigma_{p0.2}=903$ MPa
试样类型：CT $B=25$ mm，$W=100$ mm	试样类型：CT $B=20$ mm，$W=80$ mm
加载方式：轴向	加载方式：轴向
应力比：$R=0.1$	应力比：$R=0.1$
试验频率：10 Hz	试验频率：10 Hz
试验环境：35℃，5%NaCl	试验环境：24℃，空气
试样个数：2	试样个数：2
试验点数：62	试验点数：30
拟合公式：$da/dN=C\ (\Delta K)^n$	拟合公式：$da/dN=C\ (\Delta K)^n$
$C=21.6\times10^{-9}$	$C=6.99\times10^{-9}$
$n=3.98$	$n=3.38$

1.5 制造工艺和性能

(1) 热处理工艺和性能

1) 普通退火

① 普通退火制度　板材和板材零件：700～850℃，0.5～2 h，空冷；棒材和锻件：700～800℃，1～2 h，空冷。为了提高TC4钛合金粗大晶粒组织半成品的塑性，允许按以下制度退火：在α+β→β转变温度以下30～50℃加热，保温1 h，炉冷至650℃，然后空冷。

② TC4钛合金零部件退火时的加热和冷却速度在500℃以下应不大于150℃/h，而在500℃以上应不大于80℃/h。允许将零部件装入预热至温度不高于400℃的炉中。

③ TC4钛合金半成品和零件退火时可选用各种形式的电炉，入炉前必须彻底清扫炉膛。采用煤气或油炉加热时，必须对炉内气氛进行严格控制，使其保持微氧化气氛，还要注意勿使燃烧喷嘴直接喷向半成品和零件。

④ TC4钛合金半成品和零件退火时，保持时间取决于截面厚度。截面厚度小于等于10 mm时，保温时间不超过30 min；11～50 mm时为0.5～1 h，大于50 mm时为1～2 h。

⑤ 在空气中退火时零件表面会形成气体饱和层。因此，应该预先规定零件几何尺寸的余量，以便用化学腐蚀或机械加工（打磨）方法除去气体饱和层。表7.3-33列出了TC4钛合金在不同温度下加热时形成的气体饱和层厚度。

表7.3-33 TC4钛合金在不同温度下加热时形成的气体饱和层厚度 mm

加热温度/℃	保温时间/h					
	0.5	1	2	5	10	20
500	—	—	0.002	—	—	—
600	—	0.002	—	—	—	—
650	0.008	0.010	0.015	0.03	—	—
750	0.020	0.026	0.040	0.06	0.08	0.13
800	0.040	0.050	0.065	0.09	0.13	0.20
850	0.080	0.1	0.13	0.18	0.25	—

2) 真空退火

① 真空退火制度　700～800℃，0.5～2 h，炉冷至200℃以下允许出炉空冷。炉内绝对压强应不大于 6.65×10^{-2} Pa。

② 真空退火前应清除零件表面的氧化皮和气体饱和层，入炉前还要认真除油。复杂形状的零件真空退火时必须采用固定夹具，以减少零件变形。入炉零件最好用预先除气的无氧化钛削填满，以防止零件氧化。

③ 真空中的加热和冷却速度应控制在大约40℃/h。由刚性结构（零件）组成的炉料，其冷却速度可提高到80℃/h，但不应引起零件或结构几何形状的改变超出允许偏差。

3) 固溶时效处理

① 固溶处理：850～930℃，0.5～2 h，水淬。时效：450～600℃，2～6 h，空冷。

② 具体半成品和零件的固溶处理和时效加热温度，在规定的范围内根据半成品和零件的组织、截面尺寸和对力学性能的要求选定。必要时，可将时效与消除焊接应力的不完全退火合并。

③ 能确保TC4钛合金在固溶时效处理时完全淬透的最大截面是25～30 mm。半成品和零件从淬火加热结束到浸入淬火槽的转移时间应该是最短的。对淬火和时效之间的停留时间不做规定。

4) 去应力退火

① 去应力退火制度　完全去应力退火：600～650℃，

1~4 h，空冷；不完全去应力退火：500~600℃，0.5~3 h，空冷。

② 消除零件在机械加工、板材冲压、焊接等过程中形成的内应力，可以在空气或真空炉中进行去应力退火。

(2) 热变形工艺和性能

1) 热变形温度下的拉伸性能见图 7.3-14。

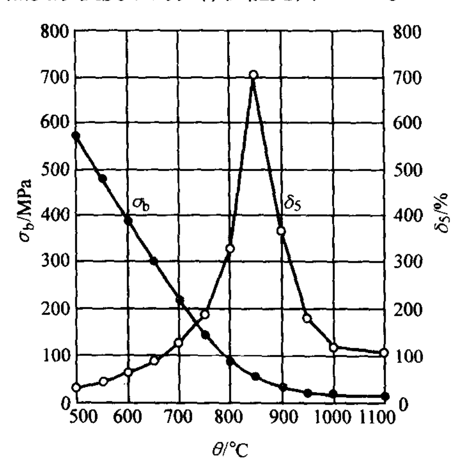


图 7.3-14　TC4 钛合金在热变形温度下的拉伸性能

2) 不同拉伸速度下的拉伸性能见图 7.3-15。

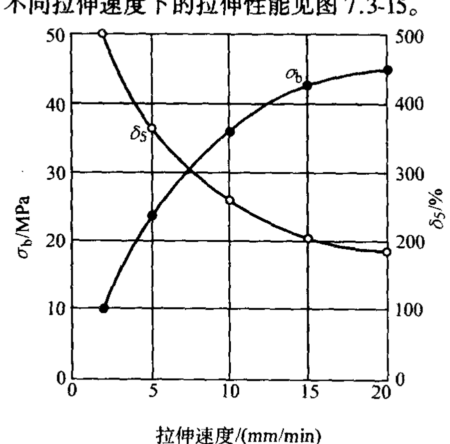


图 7.3-15　拉伸速度对 TC4 钛合金在 925℃下拉伸性能的影响

3) 不同温度下的变形抗力见表 7.3-34。

表 7.3-34　TC4 钛合金不同温度下的变形抗力

变形温度/℃	以下变形速率（S^{-1}）的最大变形抗力/MPa			
	10^{-2}	1	10	10^2
700	354	476	514	556
800	171	323	357	384
900	75	184	204	243
1 000	28	61	85	108
1 100	14	35	60	68

4) 热变形工艺规范见表 7.3-35。

表 7.3-35　TC4 钛合金热变形工艺规范

锻造类型	加热温度/℃	终锻温度/℃	每火变形量/%
铸锭开坯	1 050~1 200	≥850	30~60
坯料锻造 ≤100 mm	950~1 000	≥800	40~70
>100 mm	950~1 050	≥800	40~70
压力机模锻	920~950	≥800	40~70
锻锤模锻	950~980	≥800	40~70

(3) 冲压成形工艺和性能

1) 板材冲压成形性能见表 7.3-36。

表 7.3-36　TC4 钛合金板材冲压成形性能

θ/℃	极限拉深系数	极限翻边系数	极限压窝系数	最小弯曲半径
20	1.2~1.5	1.3~1.5	5~7	(3.5~5.0) δ
650~800	1.4~1.7	1.45~1.75	10~14	(2.3~4.0) δ

2) 板材超塑成形性能见表 7.3-37。

表 7.3-37　TC4 钛合金板材超塑成形性能

平均晶粒尺寸/μm	ASTM 级别	流变应力/MPa	应变速率敏感指数 m 值
4	13	69	0.8
9	11	103	0.6
11	10	138	0.5
20	8	172	0.4

3) TC4 钛合金板材零件的冲压成形必须在加热状态下进行，加热温度根据零件复杂性和每火变形程度在 650~800℃范围内选定。毛坯加热可在电炉或热模具中进行。

(4) 焊接工艺

1) TC4 钛合金可用钨极氩弧焊、点焊、钎焊、摩擦焊、电子束焊和等离子焊等多种方式进行焊接。焊接接头的强度与基体金属基本相当。表 7.3-38 列出了 TC4 钛合金钨极氩弧焊的推荐工艺参数。

表 7.3-38　TC4 钛合金板材（δ = 1.6 mm）钨极氩弧焊的推荐工艺参数

工艺参数	不加填充料	加填充料
电极直径/mm	1.6	1.6
填充焊丝/mm	—	1.6
焊丝进给速度/mm·min⁻¹	—	560
电压/V	10	10
电流/A	90~100	120~130
喷口内径/mm	9.5~15.9	9.5~15.9
熔池保护氩气消耗量/m³·h⁻¹	0.42	0.42
拖罩保护氩气消耗量/m³·h⁻¹	0.84	1.13
背面保护氩气消耗量/m³·h⁻¹	0.11	0.14
背面材料	铜或钢	铜或钢
背面坡口/mm	6.4×1.6（深度）	6.4×1.6（深度）
电极移动速度/mm·min⁻¹	254	305
电源	直流	直流
极性	正向	正向

2) 采用潜弧焊可以焊接厚度达 15~50 mm 的 TC4 钛合金结构件。潜弧焊能够提高焊接效率和熔透能力，并且不要求加工坡口。表 7.3-39 列出了推荐的自动潜弧焊制度。

3) 为了防止大气中氧和氮的污染，TC4 钛合金焊接时必须采用高纯惰性气体进行保护。表 7.3-40 列出了钛合金焊接时采用的惰性气体化学成分。

4) TC4 钛合金具有良好的扩散连接特性。TC4 钛合金的扩散连接全部在真空中完成，典型的扩散连接工艺参数是：加热温度 820~1 040℃，加压压力 35~70 MPa，保温时间 0.5~6 h。

表 7.3-39　TC4 钛合金自动潜弧焊推荐制度

焊接厚度 /mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /m·h⁻¹	接头间隙 /mm
4	210~250	12~14	15~20	$0^{+0.3}$
7	320~350	13~15	12~14	$0^{+0.5}$
8~10	340~380	13~15	10~12	$0^{+0.5}$
13~15	450~500	13~15	7~8	$0^{+0.7}$
23~24	800~850	15~16	13~15	0^{+1}

表 7.3-40　钛合金焊接时采用的惰性气体化学成分

惰性气体	纯度/%	杂质/% ≤				露点/℃
	≥	O	N	H	H_2O	
一级氩气	99.98	0.003	0.01	—	0.004	-50
高纯氩气	99.99	0.001	0.008	—	0.001	-58
高纯氦气	99.985	0.002	0.005	0.002 5	0.002	—

(5) 表面处理工艺

1) 喷丸强化可显著提高 TC4 钛合金的疲劳强度。

为提高钛合金零件的疲劳强度可进行表面喷丸处理。一般采用直径为 2~5 mm 的钢丸，能产生大约 785 MPa 的表面压应力，表面强化深度约为 200 μm。

2) 为改善 TC4 钛合金的耐磨性能，在零件的易磨损部位，例如风扇叶片的阻尼台侧面，采用等离子或爆炸喷涂方法喷涂碳化钨、碳化铬等难熔质点涂层。这种方法还可用于钛合金零件已磨损部位的修补。

3) 为避免钛合金零件在工作中发生擦伤和粘结，在有磨擦接触和螺纹组合的零件上，应进行阳极化、镀铬、化学镀镍或渗氮处理。

(6) 切削加工与磨削性能

1) TC4 钛合金由于导热性差、化学活性高，切削加工时刀尖处温度升高较快，容易造成刀具磨损，应注意合理选择刀具材料和加工工艺参数。采用氯化冷却液可延长刀具寿命，改善加工表面质量。

2) 铣削加工推荐采用高速钢和硬质合金螺旋立铣刀。硬质合金刀具材料应选用碳化钨类，不要选用碳化钛类。TC4 钛合金钻深孔时难度较大，应针对被加工零件设计专用钻头，选择较大的顶角。当钻头直径大于 6 mm 时，为便于排屑，应在切削刃部开分屑槽。

3) TC4 钛合金磨削时容易产生烧伤、波纹及变形。建议选用绿色碳化硅磨轮，这种磨料与刚玉及其混合磨料比较，磨削性能好、金属去除量大、功率消耗小。采用中等疏松磨轮，有利于降低磨削区温度。磨削液最好选用水剂切削液。

1.6　选材及应用

1) 航空航天工业中的应用　TC4 钛合金在航空航天工业中主要用于制造飞机结构中的各种梁、隔框、滑轨、起落架梁，航空发动机的风扇和压气机盘、叶片，航天火箭的壳体、压力容器，以及各种类型的紧固件。用 TC4 钛合金代替 30CrMnSiA 结构钢，可以实现减轻零件重量约 30%。

TC4 钛合金适合于制造从 -196℃到 450℃广阔温度范围内要求中等强度和高综合力学性能的零部件。TC4 钛合金退火状态 10 000 h 工作寿命的最高工作温度可达 450℃，而热处理强化状态 3 000 h 工作寿命的最高工作温度为 400℃。即使在 -196℃的低温，TC4 钛合金仍具有良好塑性和韧性。

一般情况下选用标准成分的 TC4 钛合金。对于需要焊接和要求高断裂韧性的飞机结构零部件，则选用氧含量不超过 0.15% 的高纯 TC4 钛合金。采用超塑成形工艺的零部件，应该选用氧含量不超过 0.18% 和氢含量不超过 0.012 5% 的 TC4 SP 钛合金板材。制造在 -196℃的低温工作的压力容器，应该选用氧含量不超过 0.13% 的超低间隙元素 TC4 ELI 钛合金。表 7.3-41 为各种改进型 Ti-6Al-4V 合金化学成分和退火状态的力学性能。

表 7.3-41　各种改进型 Ti-6Al-4V 合金化学成分和退火状态的力学性能

牌号	化学成分（质量分数）/%			杂质（质量分数）/%						σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%	φ/%	K_{1c} /MPa·$m^{1/2}$
	Al	V	Ti	Fe	Si	C	N	H	O					
				≤						≥				
BT6	5.3~6.8	3.5~5.3	余量	0.60	0.10	0.10	0.05	0.015	0.20	900~1 050		10	30	
BT6 C	5.3~6.5	3.5~4.5	余量	0.25	0.15	0.10	0.04	0.015	0.15	835~980		10	30	
BT6Ч（锻件 厚板）	5.5~6.75	3.5~4.5	余量	0.40	0.07	0.10	0.05	0.010	0.16	900~1 050		10	30	
BT6Г	5.5~6.8	3.5~4.5	余量	0.30	0.10	0.08	0.04	0.015	0.20	900	810	10	25	80
BT6K（叶片、盘）	5.5~6.8	3.5~5.3	余量	0.30	0.10	0.08	0.04	0.015	0.20	950	850	10	25	80
BT6KT（低温）	5.5~6.5	3.5~4.5	余量	0.20	0.05	0.05	0.03	0.006	0.12	室温 850	760	10	25	85
										-196℃ 1 350	1 300	10	35	60
										-253℃ 1 650	1 600	7	30	55
BT6CB（焊丝）	3.5~4.5	2.5~3.5	余量	0.15	0.10	0.05	0.04	0.003	0.12	665		12		
BT6Л（铸件）	5.4~6.8	3.5~5.3	余量	0.30	0.12	0.12	0.05	0.01	0.16	895	825	6		
Ti-6Al-4V	5.5~6.75	3.5~4.5	余量	0.30	—	0.08	0.05	0.012 5（棒，锻件）0.015（板材）	0.20	900	830	14		
Ti-6Al-4V ELI	5.5~6.5	3.5~4.5	余量	0.25	—	0.08	0.05	0.012 5	0.13	895	827	15		
TC4SP	5.5~6.8	3.5~4.5	余量	0.30	—	0.10	0.05	0.012 5	0.18	925	870	12	35	

西方广泛采用经过固溶时效处理强化的TC4钛合金紧固件代替钢制紧固件，以减轻飞机结构重量。特别是当钛合金或铝合金与碳纤维复合材料相连接时，由于相容性方面的考虑必须选用钛合金紧固件。TC4钛合金紧固件必须采用热镦方法成形，从而很容易满足对组织和流线的要求。

图7.3-16是美国F-22战斗机上用TC4钛合金制造的机身隔框模锻件，其投影面积为5.53 m²。在B-1B超音速轰炸机上选用TC4 ELI钛合金制造的机翼支撑贯穿梁结构（wing carry through structure），是按照损伤容限原则设计并用超塑成形和扩散连接方法制造的，其质量达到5 400 kg。图7.3-17是航空发动机涡扇八用TC4钛合金制造的风扇盘，其模锻件质量达到120 kg。

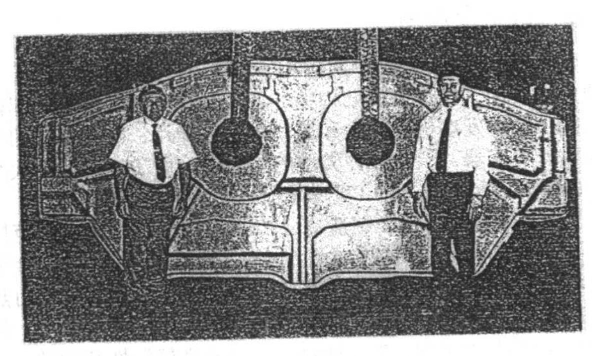


图7.3-16 450 MN水压机模锻的F-22战斗机机身隔框TC4模锻件（投影面积5.53 m²）

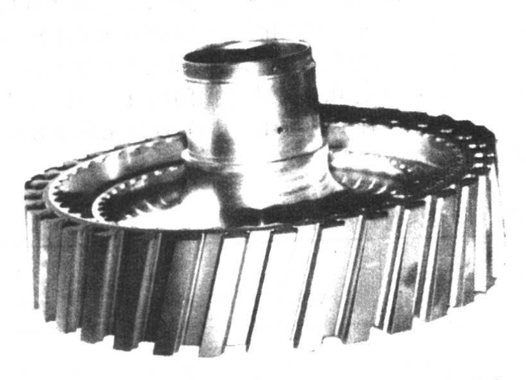


图7.3-17 航空发动机涡扇八用TC4钛合金风扇盘

2）民用行业中的应用 TC4钛合金在民用行业中也获得了广泛应用。例如电力工业中的燃气轮机叶片，造船工业中的船舶推进器，海洋工程中的近海油田钻井平台，化学工业中的各种耐蚀泵，医学中的人工植入物，各种防弹装甲以及运动器材中的高尔夫球头等。图7.3-18是日本1 000 MW燃气轮发电机用TC4钛合金制造的长度为1 016 mm最后一级叶片。采用TC4钛合金后不仅解决了钢叶片的腐蚀问题，而且由于离心力的降低能制成更长的叶片。法国已经研制成900 MW燃气轮机用长度为1 430 mm的TC4钛合金叶片。

较高的强度、低的弹性模量和良好的海水中抗疲劳性能，使TC4钛合金成为近海油田应用中的理想材料。一个应用实例是用TC4钛合金制造的联结24个海底钻孔和直径为2 134 mm的钢制竖井的应力接管（stress joint）。这种应力接管的直径为508 mm，壁厚为76.2 mm，长度为10 m，质量为4 550 kg。

TC4钛合金在汽车工业中有着很大的应用前景。TC4钛合金可用于制造汽车车架、曲柄轴、连杆、螺栓、进油阀和悬挂弹簧等。限制TC4钛合金在汽车工业中大量应用的主要因素是价格。已经研制成功低成本Ti62S（Ti-6Al-1.7Fe-0.1Si）钛合金，其力学性能和工艺塑性与TC4钛合金相当。

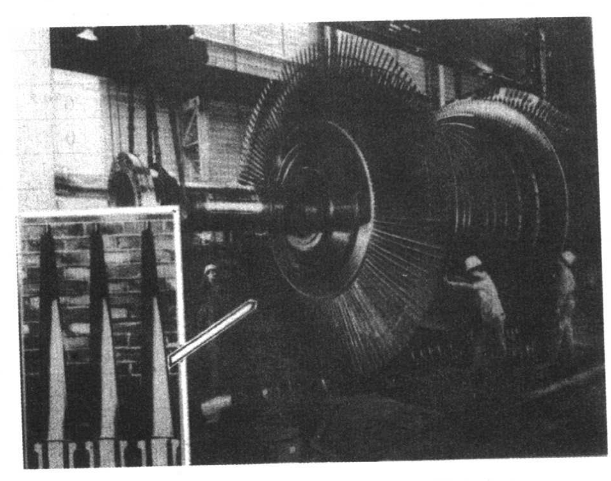


图7.3-18 1 000 MW燃气轮发电机用TC4钛合金最后一级叶片

3）应用中的特殊要求

① 接触腐蚀 当TC4钛合金零件与铝合金和结构钢零件接触时，特别是在一定的腐蚀介质条件下，铝合金和结构钢零件由于电极电位较负，作为接触偶的阳极，会遭受加速腐蚀和破坏。因此，在TC4钛合金零件与铝合金或结构钢零件之间，应垫有防接触腐蚀胶布。TC4钛合金零件严禁与铅、锌、镉、锡、银、铋等金属的零件或工具接触。

② 微动磨蚀破坏 TC4钛合金由于耐磨性较差，当零件发生微动磨蚀时，会引起疲劳强度的迅速下降。为减少微动磨蚀，在TC4钛合金零件与其他金属零件的配合面之间，应涂润滑脂、油漆，或将TC4钛合金零件表面进行阳极化处理。

③ 为确保TC4钛合金零件在使用过程中的可靠性，对于制造压气机盘、叶片和飞机结构件用的棒材、锻坯、自由锻件和模锻件，必须进行超声探伤。航空发动机用模锻件探伤，一般采用平底孔直径为0.8 mm的标准样块；飞机结构用模锻件探伤，一般采用平底孔直径为1.2 mm的标准样块。

2 TC6钛合金

TC6合金是一种综合性能良好的马氏体型α－β两相钛合金，其名义成分为Ti-6Al-2.5Mo-1.5Cr-0.5Fe-0.3Si，含有α稳定元素Al、同晶型β稳定元素Mo和共析型β稳定元素Cr、Fe和Si，β稳定系数 $K_\beta=0.6$。该合金的使用状态一般为退火状态，也可进行适当的强化热处理。TC6合金具有较高的室温强度，比TC4合金高85 MPa，而且在450℃以下有良好的热强性能。该合金还具有优良的热加工工艺性能，变形抗力小，塑性高；可以进行焊接和各种方式的机械加工。

TC6合金主要用来制造航空发动机的压气机盘和叶片等零件，能在400℃以下长时间工作6 000 h以上和在450℃工作2 000 h以下。该合金还可作为中强度合金用来制造飞机的隔框、接头等承力结构件及不同用途的紧固件。生产的半成品主要有棒材、锻件及模锻件等。

1）材料牌号 TC6。

2）相近牌号 BT3-1（俄罗斯）。

2.1 化学成分

GB/T 3620.1—1994《钛及钛合金牌号和化学成分》规定的化学成分见表7.3-42。

表 7.3-42 TC6 钛合金的化学成分（质量分数）

%

合金元素						杂质≤					
Al	Mo	Cr	Fe	Si	Ti	C	N	H	O	其他元素①	
										单个	总和
5.5~7.0	2.0~3.0	0.8~2.3	0.2~0.7	0.15~0.40	余量	0.10	0.05	0.015	0.18	0.10	0.40

① 产品出厂时供方可不检验其他元素，用户要求并在合同中注明时可予以检验。

2.2 物理及化学性能

1）密度 $\rho = 4.50\text{g/cm}^3$。

2）热导率见表 7.3-43。

表 7.3-43 TC6 钛合金的热导率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600	700
$\lambda/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	8.0	8.8	10.1	11.3	12.6	14.2	15.5	16.8

3）比热容见表 7.3-44。

表 7.3-44 TC6 钛合金的比热容

θ/℃		100	200	300	400	500	600
$c/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	退火	461	503	545	608	670	712
	固溶时效	545	—	608	670	712	—

4）线胀系数见表 7.3-45 和表 7.3-46。

表 7.3-45 TC6 钛合金的线胀系数（一）

θ/℃		20~100	20~200	20~300	20~400	20~500	20~600	20~700	20~800
$\alpha/10^{-6}\text{K}^{-1}$	退火	9.2	9.3	9.5	9.7	9.9	10.1	10.2	10.3
	固溶时效	9.2	9.5	9.8	10.0	10.3	10.5	—	—

表 7.3-46 TC6 钛合金的线胀系数（二）

θ/℃		100~200	200~300	300~400	400~500	500~600	600~700	700~800
$\alpha/10^{-6}\text{K}^{-1}$	退火	9.5	9.9	10.2	10.7	11.2	11.1	10.5
	固溶时效	9.8	10.3	10.9	11.4	11.4	12.1	13.0

5）电性能　室温电阻率 $\rho = 1.36\ \mu\Omega\cdot\text{m}$。

6）磁性能　无磁性。

7）抗氧化性能　TC6 合金在 400℃下长时间热暴露后，表面生成很薄的金黄色氧化膜，能对金属起保护作用。当温度升高时，此氧化膜变厚。温度高于 550℃后氧化严重，氧向金属内部扩散使表面形成硬化层（α层）。

8）耐腐蚀性能　TC6 合金具有较高的耐腐蚀能力，优于不锈钢。只有在浓度较高的硫酸、盐酸和正磷酸中才能发生反应；在硝酸中反应很微弱；在海水中不受腐蚀；在氢氟酸中即使浓度很低也易于反应受腐蚀。

2.3 相变及显微组织

1）相变温度　α+β↔β 相的转变温度为 970℃±20℃。

2）显微组织　合金在室温平衡状态下由 α 和 β 相组成，β 相的含量一般为 15%~20%。当合金从 β 相区快速冷却时，得到过饱和的马氏体 α′相；从 α+β 相区上部（例如 940℃）快速冷却时得到初生 α 和 α′相，并伴有少量的保留 β 相，而在时效过程中 α′和保留 β 相都分解成 α 和 β 相；若从 α+β 相区下部（例如 850℃）快速冷却，则得到初生 α 和亚稳定 β 相，在时效过程中亚稳定 β 相分解成弥散分布的 α 和 β 相。当合金从 β 相区慢冷下来时形成条状 α 和 β 相；而从 α+β 相区慢冷下来则形成初生 α 相和转变 β。所谓的“转变 β”是指以相间存在的片状次生 α 和保留 β 两种相。

2.4 力学性能

1）技术标准规定的性能见表 7.3-47。

表 7.3-47 技术标准规定的 TC6 钛合金性能

技术标准	品种	状态	d 或 δ /mm	取样方向	室温					
					σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	$a_{KU}/\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$	HBS（d/mm）
GB/T 2965—1996	棒材	退火	8~90	L	≥980	≥840①	≥10	≥25	—	—
GJB 2218—1994	棒材		21~100	L	≥980	—	≥10	≥25	—	—
			>100~150	LT	≥920	—	≥9	≥20	—	—
GJB 2744—1996	锻件		m≤60 kg	L②	≥950	≥910	≥8	≥20	≥295	3.2~3.7
Q/6S 1853—2002	锻件	退火	δ≤100	L②	980~1 180	—	≥10	≥25	≥295	3.2~3.7
			δ>100~200	LT	930~1 180	—	≥8	≥20	≥295	3.2~3.7
		固溶时效①	δ≤40	L	≥1 180	—	≥6	≥20	≥295	3.2~3.7
			δ>40~60		≥1 180	—	≥6	≥16	≥295	3.2~3.7

技术标准	400℃				
	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%	σ_{50}/MPa	σ_{100}/MPa
GB/T 2965—1996	≥735①	—	—	—	≥665①
GJB 2218—1994	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—
GJB 2744—1996	≥720	≥14①	≥40①	—	≥550①
Q/6S 1853—2002	≥705	—	—	≥685	≥665③

① 当需方要求并在合同中注明时方予测试。

② 采用横向或短横向试样测得的 δ_5 和 ψ 值允许比规定的纵向值低 20%。

③ 重复和仲裁试验按 100 h 规定进行。

2）硬度见表7.3-48。

表7.3-48 TC6钛合金的硬度

品种	d/mm	θ/℃	状态	HB
锻棒	60	20	等温退火	285～340
			双重退火	340～385

3）拉伸性能

① 各种半成品的拉伸性能见表7.3-49。

表7.3-49 TC6钛合金半成品的拉伸性能

品种	d或δ /mm	状态	取样方向	θ /℃	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
棒材	28	双重退火	L	20	1 231	1 223	15.5	41.3
				400	977	—	17.0	53.9
棒材（网篮组织）	22		L	20	1 197	1 069	14.8	22.4
				400	886	—	16.1	54.2
锻棒	70		L	20	1 144	—	13.0	35.6
				400	886	715	14.8	48.0
锻棒	120		L	20	1 106	1 058	14.8	44.5
				400	858	684	15.8	53.5
			LT	20	1 160	1 095	11.4	32.5

续表7.3-49

品种	d或δ /mm	状态	取样方向	θ /℃	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
叶片	—	等温退火	LT	20	1 092	1 036	18.7	55.8
				400	760	—	18.3	64.7
饼坯	400×102		C	20	1 005	982	19.5	47.6
				400	746	—	21.1	55.2
盘模锻件（网篮组织）	496×62		C	20	1 026	966	16.2	30.2
				400	774	—	17.6	42.4
等温锻造盘件	234～274		C	20	1 021	992	16.9	42.1
				400	764	—	17.8	51.9
			L	20	1 024	1 007	18.9	44.4
				400	767	—	19.2	53.2
作动筒筒体①	66		L	20	1 110	1 095	19.3	45.2
				400	838	729	18.7	54.4

① 作动筒筒体采用等温挤压工艺制造。

② 各种温度下的拉伸性能见表7.3-50和表7.3-51。

4）压缩性能见表7.3-52。

5）冲击性能见表7.3-53。

表7.3-50 TC6钛合金棒材在各种温度下的拉伸性能

品种	d或δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	$\sigma_{p0.01}$/MPa	δ_{10}/%	ψ/%	δ_5/%	ψ/%
锻棒（网篮组织）	60	等温退火	L	-196	1 373	—	—	6	25	—	—
				-70	1 177	—	—	10	30	—	—
				-40	1 098	—	—	12	40	—	—
				20	981～1 177	912～1 128	834～1 079	9～13	25～40	10～18	30～50
				100	932	804	736	10	48	15	45
				200	883	716	637	9	50	14	52
				300	814	637	539	10	51	14	52
				400	785	618	510	8	47	15	55
				450	736	588	432	11	56	17	63
				500	657	539	363	13	60	16	69
		850℃，1 h，水淬+550℃，5 h，空冷	L	-196	1 961	—	—	4	20	—	—
				-70	1 530	—	—	5	26	—	—
				-40	1 353	—	—	8	30	—	—
				20	1 275	1 128	1 030	4～10	15～30	7～12	20～35
				100	1 177	1 030	883	6	35	—	—
				200	1 079	932	785	6	35	—	—
				300	1 030	834	637	6	35	—	—
				400	932	785	618	6	50	—	—
				450	883	716	569	6.5	55	—	—
				500	874	637	490	8	60	—	—
锻棒	120	880℃，1.5 h，空冷+550℃，2 h，空冷	L	20	1 106	1 058	—	—	—	14.8	44.5
				100	1 052	956	—	—	—	15.5	43.2
				200	970	840	—	—	—	17.0	49.2
				300	896	731	—	—	—	15.7	50.8
				400	858	684	—	—	—	15.8	53.15
				500	760	618	—	—	—	21.4	67.2
				600	511	402	—	—	—	46.3	89.5

表 7.3-51　TC6 钛合金模锻件在各种温度下的拉伸性能

品种	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.01}$/MPa	$\sigma_{p0.1}$/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	$\sigma_{0.7}$/MPa	$\sigma_{0.85}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
模锻件（网篮组织）	δ95	普通退火	L	20	1 057	804	980	1 000	1 016	991	15.6	42.6
				100	968	754	853	868	878	860	15.7	44.6
				200	911	689	772	789	799	779	16.5	47.9
				300	855	597	683	703	714	688	16.1	49.2
				400	812	566	635	656	671	640	15.6	52.1

表 7.3-52　TC6 钛合金的压缩性能

品种	d 或 δ /mm	状态	θ/℃	取样方向	σ_{bc} /MPa	$\sigma_{Pc0.2}$ /MPa
棒材	20	等温退火	20	L	1 687	1 253
		双重退火			1 799	1 451
		固溶时效			1 865	—
模锻件（网篮组织）	δ95	普通退火	20	L	—	1 088

表 7.3-53　TC6 钛合金的冲击性能

品种	d 或 δ/mm	状态	θ/℃	取样方向	a_{KU}/kJ·m^{-2}
棒材	20	等温退火	20	L	545
		双重退火		L	432
锻棒	70	双重退火		L	437
锻棒	120	双重退火		L	530
				T	295
棒材	30	固溶时效		L	311
棒材	21 ~ 90	等温退火	20	L	460
棒材	> 100 ~ 150			T	442
锻件	m≤60 kg			L	475
叶片	—			LT	495
饼坯	400 × 102			C	524
盘模锻件（网篮组织）	496 × 102			C	644
等温锻造锻件	m≤60 kg			L	537
作动筒筒体①	66			L	365
模锻件（网篮组织）	δ95	普通退火	20	L	502

① 作动筒筒体采用等温挤压工艺制造。

6）扭转性能见表 7.3-54。

表 7.3-54　TC6 钛合金的扭转性能

品种	d /mm	状态	θ /℃	取样方向	τ_b	$\tau_{P0.3}$	$\tau_{P0.01}$	扭转角 /(°)
					MPa			
棒材	20	等温退火	20	L	980	712	655	745
		双重退火			1 086	—	—	745
		固溶时效			1 087	877	812	190

续表 7.3-54

品种	d /mm	状态	θ /℃	取样方向	τ_b	$\tau_{P0.3}$	$\tau_{P0.01}$	扭转角 /(°)
					MPa			
模锻件（网篮组织）	δ95	普通退火	20	L	924	686	548	—

7）剪切性能见表 7.3-55。

表 7.3-55　TC6 钛合金的剪切性能

品种	d/mm	状态	θ/℃	取样方向	τ/MPa
棒材	20	等温退火	20	L	720
		双重退火			734
		固溶时效			804
模锻件（网篮组织）	δ95	普通退火	20	L	732

8）承载性能见表 7.3-56。

表 7.3-56　TC6 钛合金的承载性能

品种	δ/mm	状态	θ/℃	取样方向	e/D	σ_{bru} /MPa	σ_{bry} /MPa
模锻件（网篮组织）	δ95	普通退火	20	L	2.0	2 161	1 688

9）热稳定性见表 7.3-57 和表 7.3-58。

表 7.3-57　TC6 钛合金的热稳定性

品种	d/mm	状态	取样方向	热暴露条件		σ_b /MPa	δ_5	ψ	a_{KU} /kJ·m^{-2}
				θ/℃	t/h		%		
棒材	12	等温退火	L	未暴露		1 079	16	45	392
				400	100	1 079	16	40	392
					500	1 118	16	40	392
					2 000	1 147	16	40	392
					3 000	1 147	16	40	392
					6 000	1 147	16	40	392
					10 000	1 128	15	35	294
					15 000	1 177	12	20	196
				450	500	1 147	15	40	294
					2 000	1 157	8	15	294
棒材	12	固溶时效	L	未暴露		1 206	12	43	392
				400	6 000	1 275	11	30	196
					10 000	1 275	10	25	196
					15 000	1 324	4	8	118

表 7.3-58　TC6 钛合金的热稳定性

品种	d 或 δ/mm	状态	取样方向	热暴露条件 θ/b	热暴露条件 t/h	σ_b/MPa	δ_5 (%)	ψ (%)	a_{KU} /kJ·m^{-2}
棒材	65	等温退火	L	未暴露		1 062	14.4	41.1	—
				400	100	1 050	16.4	42.2	—
					500	1 061	15.2	40.7	—
					1 000	1 076	16.4	35.6	—
					2 000	1 111	17.8	35.6	—
盘模锻件（网篮组织）	496×62	等温退火	C	未暴露		1 026	16.2	30.2	644
				400	100	1 051	14.0	27.5	618
					200	1 029	15.4	24.6	—
					500	1 055	14.1	25.3	520
				450	100	1 078	14.8	24.4	—
棒材	20	双重退火	L	未暴露		1 232	12.5	42.7	—
				400	100	1 258	14.5	44.0	—
					500	1 270	13.1	43.4	—
锻棒	120	双重退火	L	未暴露		1 106	14.8	44.5	—
				400	100	1 134	14.8	41.6	—
模锻件（网篮组织）	δ95	普通退火	L（轴部）	未暴露		1 060	1 003	16.9	46.0
				300	2 000	1 125	1 067	15.7	43.0
					3 000	1 115	1 043	15.0	37.8
					5 000	1 134	1 054	12.9	32.6
			L（肋部）	未暴露		1 054	999	15.7	36.0
				300	500	1 060	998	14.7	31.5
					3 000	1 096	1 020	14.8	26.4
					5 000	1 126	1 037	10.5	23.2

10）持久和蠕变性能

① 高温持久性能见表 7.3-59。

表 7.3-59　TC6 钛合金的高温持久性能

品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_{100} (MPa)	σ_{500} (MPa)	σ_{2000} (MPa)
锻棒（网篮组织）	≤60	等温退火	L	300	804	794	765
				400	765	745	706
				450	598	578	520
				500	392	—	—
		固溶时效	L	300	1 020	1 010	1 000
				400	932	902	863
				450	657	618	510
				500	353	—	—
模锻件（网篮组织）	δ95	普通退火	L	400	800	—	—

② 高温蠕变性能见表 7.3-60。

表 7.3-60　TC6 钛合金的高温蠕变性能

品种	d /mm	状态	取样方向	θ /℃	$\sigma_{0.2/25}$ (MPa)	$\sigma_{0.2/50}$ (MPa)	$\sigma_{0.2/100}$ (MPa)	$\sigma_{0.2/500}$ (MPa)	$\sigma_{0.2/1000}$ (MPa)
锻棒（网篮组织）	≤60	等温退火	L	300	—	—	637	608	588
				400	510	500	490	441	363
				450	289	284	275	226	196
				500	98	88	78	—	—

续表 7.3-60

品种	d /mm	状态	取样方向	θ /℃	$\sigma_{0.2/25}$ (MPa)	$\sigma_{0.2/50}$ (MPa)	$\sigma_{0.2/100}$ (MPa)	$\sigma_{0.2/500}$ (MPa)	$\sigma_{0.2/1000}$ (MPa)
锻棒（网篮组织）	≤60	固溶时效	L	300	—	—	784	765	735
				400	—	—	588	510	431
				450	392	—	245	196	—
				500	—	—	—	—	—
模锻件（网篮组织）	δ95	普通退火	L	400	—	—	410	—	—

11）疲劳性能

① 高周疲劳　锻棒旋转弯曲疲劳极限见表 7.3-61。

表 7.3-61　TC6 钛合金锻棒的旋转弯曲疲劳极限

品种	d /mm	状态	取样方向	θ /℃	K_t①	R	N/周	σ_D /MPa
锻棒（网篮组织）	≤60	等温退火	L	20	1	-1	2×10^7	520
					2.2			412
				400	1	-1	2×10^7	471
					2.2		10^7	373
		固溶时效	L	20	1	-1	2×10^7	608
					2.2			422
				400	1	-1	2×10^7	481

① 试样工作直径 $d=5$ mm。

盘模锻件旋转弯曲疲劳极限见表 7.3-62。

表 7.3-62 TC6 钛合金盘模锻件的旋转弯曲疲劳极限

品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t①	R	N/周	σ_D /MPa
盘模锻件（网篮组织）	496 × 62	等温退火	C	20	1	-1	2 × 10^7	500
					1.7			340
				400	1			414

① 试样工作直径 d = 4 mm。

轴向加载疲劳极限见表 7.3-63。

表 7.3-63 TC6 钛合金的轴向加载疲劳极限

品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	N/周	σ_D /MPa
棒材	20	双重退火	L	20	1	0.1	10^7	763
					3			297
	20	普通退火	L	20	1	0.1	10^7	719
					3			335
模锻件（网篮组织）	δ95	普通退火	L	20	1	0.1	10^7	650
					3			292

模锻件轴向加载室温疲劳 S-N 曲线见图 7.3-19。

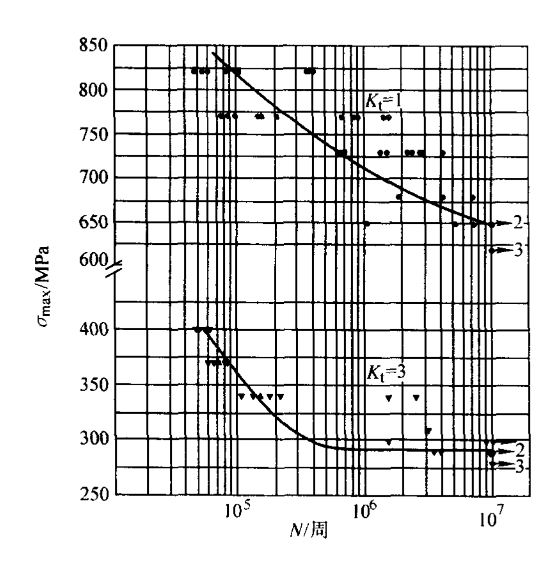


图 7.3-19 TC6 钛合金模锻件室温轴向加载疲劳 S-N 曲线

材料品种：前肩轴模锻件（网篮组织） 试样尺寸：d = 5 mm
热处理状态：800℃，2 h，空冷 加载方式：轴向
材料强度：σ_b = 1 050 MPa，$\sigma_{p0.2}$ = 1 000 MPa 应力比：0.1
取样方向：L 试验频率：130 Hz
试样数量：72 试验环境：20℃空气

② 低周疲劳 应力控制低周疲劳性能见表 7.3-64。

表 7.3-64 TC6 钛合金应力控制低周疲劳性能

品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	θ /℃	K_t	R	f /Hz	K	σ_{max} /MPa	N /周
棒材	22	等温退火	L	20	2.4	0.1	0.17	0.5	692	7 881
		双重退火							760	5 057
棒材（网篮组织）	22	等温退火	L	20	2.4	0.1	0.17	0.5	716	9 732
		双重退火							749	6 234

续表 7.3-64

品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	θ /℃	K_t	R	f /Hz	K	σ_{max} /MPa	N /周
饼坯	525 × 90	等温退火	C	20	2.4	0.1	0.5	0.5	687	10 460
								0.7	961	2 495
盘模锻件（网篮组织）	496 × 62						0.2	0.5	679	6 305
								0.7	950	1 786
				400	2.4	0.1	0.2	0.5	487	8 309
								0.7	682	2 245

12）弹性性能

① 弹性模量见表 7.3-65。

表 7.3-65 TC6 钛合金的弹性模量

品种	d 或 δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	E/GPa	E_D/GPa
锻棒	60	等温退火	L	20	113	125
				100	111	121
				200	109	117
				300	106	112
				400	98	101
				450	96	100
				500	87	98
				600	78	96
		固溶时效	L	20	113	125
				100	107	122
				200	102	117
				300	101	111
				400	101	107
				450	93	103
				500	85	100
				600	72	95
	120	双重退火	L	20	113	—
				100	111	—
				200	109	—
				300	106	—
				400	99	—
				500	90	—
				600	57	—
模锻件（网篮组织）	δ95	普通退火	L	20	117	—
				100	107	—
				200	104	—
				300	100	—
				400	91	—

② 切变模量见表 7.3-66。

表 7.3-66 TC6 钛合金的切变模量

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	G/GPa
棒材	20	等温退火	L	20	46
		双重退火			44
		固溶时效			47
模锻件（网篮组织）	δ95	普通退火	L	20	45

③ 泊松比见表 7.3-67。

表 7.3-67 TC6 钛合金的泊松比

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	μ
棒材	14	等温退火	L	20	0.30

13）断裂性能

① 断裂韧度见表7.3-68。

表7.3-68　TC6钛合金的断裂韧度

品种	d或δ /mm	状态	θ /℃	试样类型	取样方向	K_{IC} /MPa·m$^{1/2}$
锻棒	120	双重退火	20	CT	L-R	49.8
					C-R	43.7
框件	88×40	等温退火	20	CT	C-R	60.1
		双重退火				54.2
框件（网篮组织）	88×40	等温退火	20	CT	C-R	76.8
		双重退火				72.9
		固溶时效				49.4
模锻件（网篮组织）	δ95	普通退火	20	CT	T-L	87.4
		双重退火				52.0

② 疲劳裂纹扩展速率　锻棒的 $da/dN-\Delta K$ 曲线见图7.3-20。

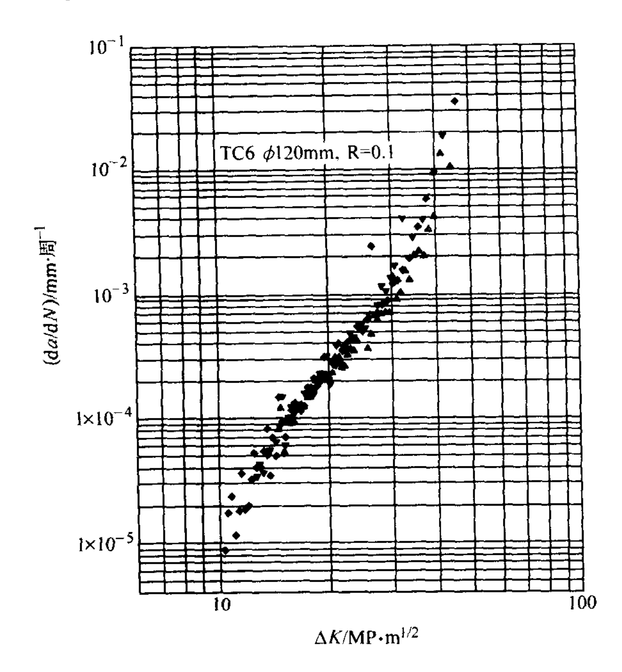


图7.3-20　TC6钛合金锻棒的室温 $da/dN-\Delta K$ 曲线

材料品种：棒材　　加载方式：轴向
材料规格：ϕ120 mm　　应力比：0.1
热处理状态：880℃，1.5 h，空冷 + 550℃，2 h，空冷　　试验频率：10 Hz
材料强度：σ_b = 1 160 MPa，$\sigma_{p0.2}$ = 1 095 MPa　　试验环境：20℃空气
取样方向：C-R　　试验点数：146
试样数量：3　　拟合公式：$da/dN=C(\Delta K)^n$，
试样类型：CT型 B = 10 mm，W = 40 mm　　$C=1.66\times10^{-9}$，n = 3.945 47

前肩轴模锻件（网篮组织）的 $da/dN-\Delta K$ 曲线见图7.3-21。

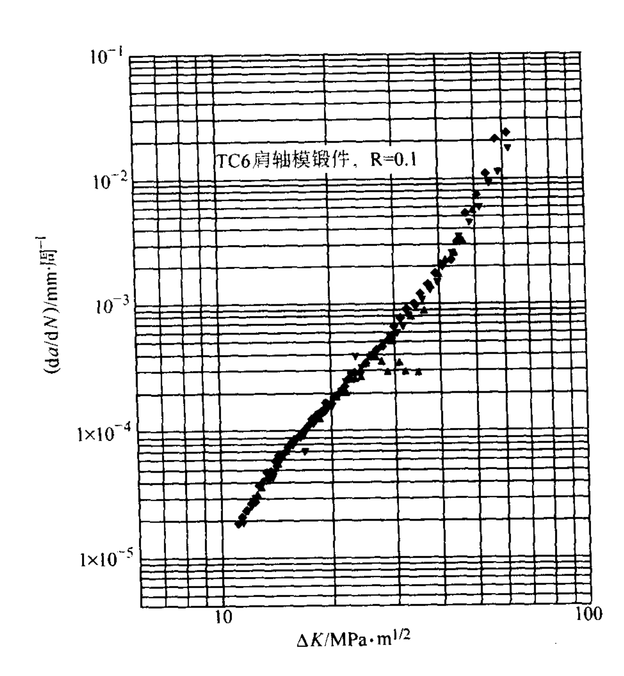


图7.3-21　TC6钛合金前肩轴模锻件的室温 $da/dN-\Delta K$ 曲线

材料品种：前肩轴模锻件（网篮组织）　　加载方式：轴向
热处理状态：800℃/2 h，空冷　　应力比：0.1
材料强度：σ_b = 1 050 MPa，$\sigma_{0.2}$ = 998 MPa　　试验频率：10 Hz
取样方向：T-L　　试验环境：20℃空气
试样数量：3　　试验点数：138
试样类型：CT型 B = 10 mm，W = 40 mm　　拟合公式：$da/dN=C(\Delta K)^n$，$C=3.78\times10^{-9}$，n = 3.582

2.5　制造工艺和性能

1）熔炼与铸造工艺　制造棒材和锻件用的铸锭应经过两次以上真空自耗电弧炉熔炼。选用氧含量不大于0.08%的0~2级小颗粒海绵钛，钼含量为50%的Al-Mo中间合金和硅含量为10%的Al-Si中间合金以及工业级铁丝或铁粒。应特别注意电极块的布料方式，保证各种合金元素在电极块中的分布均匀性。自耗电极的焊接采用氩气保护等离子焊接方法，严禁使用钨极氩弧焊。一次真空熔炼时的绝对压强应不大于1.3 Pa。最后一次重熔可以在真空中或氩气气氛中进行。熔炼结束前必须进行热封顶操作。

2）热处理制度

① 普通退火　800~850℃，1~2 h，空冷。

② 等温退火　870~920℃，1~2 h，炉冷至550~650℃或转移到炉温为550~650℃的另一炉中，保温2 h，空冷。一般用于截面≤50 mm。

③ 双重退火　870~920℃，1~2 h，空冷+550~600℃，2~5 h，空冷。一般用于截面>50 mm。

④ 去应力退火　530~620℃，0.5~6 h，空冷或炉冷。焊接后800~850℃，1~3 h，空冷或炉冷。

⑤ 固溶处理　840~900℃，20~120 min，水淬。

⑥ 时效　500~620℃，1~4 h，空冷。

3）热变形工艺规范见表7.3-69。不同变形速率下的变形抗力见表7.3-70。工艺塑性图见图7.3-22。

表7.3-69　TC6钛合金的热变形工艺规范

变形类型	加热温度/℃	终止温度/℃	一火变形量/%
铸锭开坯	1 100~1 150	≥850	30~60
坯料锻造	950~1 050	≥800	40~70
压力机模锻	930~950	≥800	40~70
锻锤模锻	940~950	≥800	40~70
等温挤压	~940	—	—
棒材挤压	840~900	—	—
棒材轧制	920~940	≥800	40~75

表 7.3-70 TC6 钛合金的变形抗力

变形温度 ℃	以下变形速率（s^{-1}）的最大变形抗力/MPa			
	10^{-2}	1	10	10^2
700	290	499	513	527
800	133	271	313	335
900	47	103	152	205
1 000	28	57	91	115
1 100	16	44	64	82

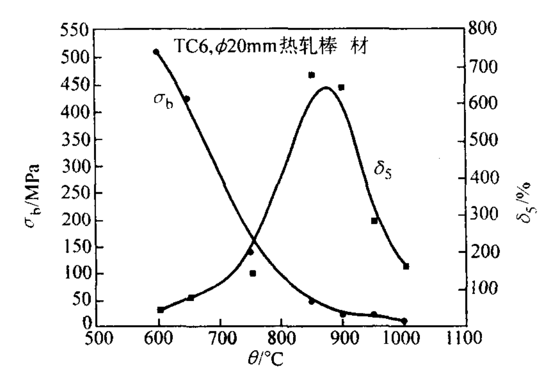


图 7.3-22 TC6 钛合金棒材的工艺塑性

4）超塑性能 TC6合金具有优异的超塑特性，呈细小等轴组织的材料在900℃可获得的断后伸长率大于900%。

5）焊接性能 TC6合金可应用于焊接结构，一般采用钨极氩弧焊和电子束焊。但由于该合金属于高合金化的α-β型钛合金，对于焊接中的热循环反应较大，所以焊缝及其邻近区，可能发生不利的组织与性能变化，需要采用专门的热处理来消除或减小这种变化的影响。

① 氩弧焊和电子束焊的焊接规范见表7.3-71。

表 7.3-71 TC6 钛合金氩弧焊和电子束焊的焊接规范

焊接方法	δ/mm	U/kV	I/A	$v/m\cdot min^{-1}$
自动氩弧焊	10～15	—	170～200	11
	4～5	—	175	11
	2	—	180	30
	3	—	180～185	13
电子束焊	4～5	28	0.035	0.5
	10～15	28～30	0.11～0.17	0.58～0.83

② 氩弧焊焊接接头的室温力学性能见表7.3-72。

③ 氩弧焊焊接头的400℃力学性能见表7.3-73。

④ 电子束焊焊接接头的力学性能见表7.3-74。

⑤ 斜支柱自动钨极氩弧焊焊接接头的拉伸性能见表7.3-75。

表 7.3-72 TC6 钛合金氩弧焊焊接接头的室温力学性能

δ/mm	填充材料	状态	σ_b/MPa	δ	ψ	a_{KU}②$/kJ\cdot m^{-2}$	α/(°)	HRC	
				%				焊缝	过渡区
4～10	Ti-3Al	基体金属①	1 079	13	41	471	28～34	—	—
		焊接后	834	4	18	434	—	—	—
		焊接+650℃，2 h，空冷	765	4	19	216	25～30	35～36	46～47
		焊接+700℃，2 h，空冷	814	5	27	588	—	—	—
		焊接+850℃，2 h，空冷	736	5	33	294	38～40	26～28	37～38
	Ti-4Al-1V-1Mo-2Zr	焊接后	1 059	6	30	235	—	—	—
		焊接+650℃，2 h，空冷	1 128	6	21	196	脆断	41～42	46～47
		焊接+750℃，2 h，空冷	1 059	7	16	343	33～35	—	—
		焊接+800℃，2 h，空冷	1 020	5	18	490	30～40	—	—

① 经等温退火。
② 冲击试样的缺口开在焊缝过渡区上。

表 7.3-73 TC6 钛合金氩弧焊焊接头的 400℃力学性能

δ/mm	填充材料	状态	σ_b/MPa	δ/%	ψ/%	持久强度			
						σ/MPa	破断时间/h	δ/%	ψ/%
4～10	Ti-4Al-1V-1Mo-2Zr	基体金属①	834	14	38	716	500②	—	—
		焊接+800℃，2 h，空冷	716	5	31	667	504②	—	—
			745	8	36	696	296	10	45

① 经等温退火。
② 试样未断，取下。

表 7.3-74 TC6 钛合金电子束焊焊接接头的力学性能

δ/mm	状态	θ/℃	σ_b/MPa	a_{KU}②$/kJ\cdot m^{-2}$	α/(°)	持久强度	
						σ/MPa	试验时间/h
15	基体金属①	20	1 049～1 059	441～490	—	—	—
		300	814～824	—	—	—	—
		400	804～814	—	—	—	—

续表 7.3-74

δ/mm	状态	θ/℃	σ_b/MPa	a_{KU}[②]/kJ·m^{-2}	α/(°)	持久强度	
						σ/MPa	试验时间/h
15	焊接+800℃，1h，空冷	20 300 400	1 000~1 010 765~775 736~765	196~343 — —	— — —	— — 736~755	— — 285[③]
4	焊接+800℃，1h，空冷	20 300 400	1 059~1 079 883~892 785~834	353~392 — —	32~40 — —	— — 785~804	— — 168[③]
	焊接+800℃，1h，空冷+300℃，500 h	20	—	333~343	26~30	—	—
	焊接+800℃，1 h，空冷+400℃，500 h	20	—	196~216	16~17	—	—

① 经等温退火。
② 冲击试样的缺口开在焊缝中心。
③ 试样未断，取下。

表 7.3-75 TC6 钛合金斜支柱自动钨极氩弧焊焊接接头的拉伸性能

基体	焊丝	状态	θ/℃	σ_b/MPa	δ_5/%	断裂位置
TC6	TA20	850℃，2 h，空冷+焊接+800℃，1.5 h，炉冷	20	1 049	10.8	焊缝
				1 054	11.1	基体
				1 018	11.7	焊缝

⑥ 钨极氩弧焊焊接接头低温和高温拉伸性能 TC6 钛合金自动钨极氩弧焊焊接接头的低温和高温拉伸性能分别见表 7.3-76 和表 7.3-77。

表 7.3-76 TC6 钛合金自动钨极氩弧焊焊接接头的低温性能

试样	状态	施焊层数	θ/℃	σ_b/MPa	δ_5/%	断裂位置
焊接接头	850℃，2 h，空冷+焊接+800℃，1.5 h，炉冷	3	-60	1 167	7.4	基体
基体	800℃，1.5 h，空冷	—	-70	1 227	14.3	—

注：焊后去除焊缝正面和背面余高，试样加工成 4.5 mm 厚的标准板材试样。

表 7.3-77 TC6 钛合金自动钨极氩弧焊焊接接头的高温性能

试样	状态	施焊层数	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%
焊接接头	850℃，2 h，空冷+焊接+800℃，1.5 h，炉冷	3	400	747	491	13.2
基体	800℃，1.5 h，空冷	—	400	812	656	15.6

注：焊后去除焊缝正面和背面余高，试样加工成为 4.5 mm 厚的标准板材试样。

⑦ 钨极氩弧焊焊接接头的冲击性能见表 7.3-78。

表 7.3-78 TC6 钛合金自动钨极氩弧焊焊接接头的冲击性能

试样	状态	施焊层数	θ/℃	a_{KU}/kJ·m^{-2}
焊接接头	850℃，2 h，空冷+焊接+800℃，1.5 h，炉冷	3	20	403
基体	800℃，1.5 h，空冷	—	20	551

注：1. 焊后去除焊缝正面和背面余高，试样加工成为 5 mm×5 mm×40 mm 的 U 型缺口试样。
2. 焊缝位于试样中心，缺口开在焊缝中央。

⑧ 钨极氩弧焊焊接接头的缺口敏感系数见表 7.3-79。

表 7.3-79 TC6 钛合金自动钨极氩弧焊焊接接头的缺口敏感系数

基体	焊丝	状态	K_t	σ_{bH}/MPa	σ_b/MPa	σ_{bH}/σ_b
TC6	TA20 ϕ2.0 mm	850℃，2 h，空冷+焊接+800℃，1.5 h，炉冷	3	1 235	1 035	1.15

注：焊后去除焊缝正面和背面余高，试样加工成 4.5 mm 厚的标准板材试样。

⑨ 钨极氩弧焊焊接接头的抗腐蚀性能见表 7.3-80。

表 7.3-80 TC6 钛合金自动钨极氩弧焊焊接接头的抗腐蚀性能

基体	焊丝	状态	试验条件	σ_b/MPa	δ_{10}/%	断裂位置
TC6	TA20 ϕ2.0 mm	850℃，2 h，空冷+焊接+800℃，1.5 h，炉冷	室温 3.5% NaCl 溶液 50 h	1 049	8.2	焊缝

注：1. 试样取自 Φ70 mm 的管材对接模拟试件。
2. 焊后去除焊缝正面和背面余高，试样加工成 4.5 mm 厚的标准管材试样。

⑩ 钨极氩弧焊焊接接头的疲劳性能见表 7.3-81、表 7.3-82。

表 7.3-81 TC6 钛合金自动钨极氩弧焊焊接接头的光滑疲劳性能

试验类型	σ_{max}/MPa	疲劳寿命 $N/10^3$	
$K_t=1$ $R=0.1$ $f=160$ Hz			
升降法	410	7 076 3 073	指定寿命 $N=10^7$ 接头 $\sigma_D=390$ MPa 基体 $\sigma_D=719$ MPa
	395	>10 000 3 844 833 195 >10 000 514	
	380	>10 000 164 >10 000 >10 000 >10 000	
	365	>10 000	

注：焊后去除焊缝正面和背面余高，试样加工成 4.5 mm 厚的标准板材试样。

表 7.3-82　TC6 钛合金自动钨极氩弧焊焊接接头的缺口疲劳性能

试验类型	σ_{max}/MPa	疲劳寿命 $N/10^3$	寿命对数平均值 X	标准差 S	平均寿命 $N/10^3$
$K_t=3$　$R=0.1$　$f=160$ Hz					
成组法	350	51　30　42　57	4.641 0	0.122 2	43.75
	320	59　47　45　38	4.669 0	0.078 7	46.67
升降法	290	162	指定寿命 $N=10^7$ 接头 $\sigma_D=267$ MPa 基体 $\sigma_D=335$ MPa		
	280	> 10 000　929			
	270	> 10 000　1 620　45			
	260	> 10 000　> 10 000　8 010　196			
	250	> 10 000　> 10 000			

注：焊后去除焊缝正面和背面余高，试样加工成 4.5 mm 厚的标准板材试样。

6）表面处理工艺见表 7.3-83。

表 7.3-83　TC6 钛合金的表面处理工艺

名称	工艺过程	用途
镀铬	1）镀一层乳白色铬作底层 2) 850～870℃，1 h，真空处理 3）镀表面硬铬层	提高耐磨性
镀银	1）镀镍（2～3 μm）或镀铜（0.5～1 μm）作底层 2）镀银 3～6 μm	使 300℃以上工作的零件表面耐磨
渗氮	在 850～950℃加热，通入压力不高的氮	提高耐磨性
喷丸处理	在变压器油中用直径为 2 mm 的钢丸处理 8 min	提高疲劳性能

7）切削加工与磨削性能

① 切削加工　该合金能够顺利进行切削加工。但由于钛合金的导热率低，切削时从零件上带走的热量较少，使刀头温度升高，加快了刀具的磨损；另外，切削时剪切角比较大，刀尖上的单位面积压力增大，也促使刀具磨损。因此，在切削过程中必须注意几点：切削速度低，比一般钢要低 50%；切削深度和走刀量应适当加大；充分使用冷却液；合理地选用刀具材料和几何参数，并及时更换刀具。

② 磨削加工　该合金能够进行磨削加工，但由于磨面硬化性强，加工性差，容易产生烧伤和挤裂现象，砂轮极易磨损。采用 Q7S-1 切削液使加工性有所改善，并能进行内孔磨加工，其表面粗糙度 R_a 值为 0.8 μm。

2.6　选材及应用

TC6 合金是俄罗斯最成熟和应用最广的钛合金。我国早已在航空发动机上批量使用该合金制造承力卡箍、作动筒筒体、尾杆等航空零件，并在歼击机上开始用于制造承力结构件。建议在各种型号的飞机和发动机上选用 TC6 钛合金。

3　TC11 钛合金

TC11 钛合金是一种综合性能良好的 α－β 型钛合金，名义成分为 Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si，铝当量为 3.5，钼当量为 7.3。在 500℃以下有优异的热强性能，并且具有较高室温强度。该合金还具有良好的热加工工艺性（包括常规工艺性能和超塑性），可以进行焊接和各种方式的机加工。目前，随着 TC11 钛合金应用的不断扩大，该合金的 β 热处理及等温锻已获得迅速的发展。

该合金主要用于制造航空发动机的压气机盘、叶片、鼓筒等零件，也可用于制造飞机结构件。通过 α－β 区的热变形和热处理，该合金的最高长期工作温度为 500℃。生产的半成品有棒材、锻件、模锻件和铸件等。

1）材料牌号　TC11。

2）相近牌号　BT9、BT9Д（俄罗斯）。

3.1　化学成分

根据 GB/T 3620.1—1994《钛及钛合金牌号和化学成分》、GJB 494—1988《航空发动机压气机叶片用 TC11 钛合金棒材》、GJB 2220—1994《航空发动机用钛合金饼、环坯规范》和 HB 5263—1995《TC11 钛合金压气机盘模锻件》规定的化学成分见表 7.3-84。

3.2　物理及化学性能

1）密度 $\rho=4.48$ g/cm^3。

2）热导率见表 7.3-85。

3）比热容见表 7.3-86。

表 7.3-84　TC11 钛合金化学成分（质量分数）　%

合金元素					杂质，不大于						
Al	Mo	Zr	Si	Ti	Fe	C	N	H	O	其他元素②	
										单一	总和
5.8～7.0	2.8～3.8	0.8～2.0	0.20～0.35	余量	0.25	0.10	0.05	0.012①	0.15	0.10	0.40③

① GJB 2220—1994 规定 $H\leqslant0.010\%$。
② 产品出厂时供方可不检验其他元素，用户要求并在合同中注明时可予以检验。
③ GJB 494—1988、GJB 2220—1994 和 HB 5263—1995 规定其他元素总和≤0.30%。

表 7.3-85　TC11 钛合金热导率

θ/℃	107	200	303	414	504	603	709	797	890
λ/W·m^{-1}·K^{-1}	6.3	7.5	9.2	10.5	12.1	13.0	14.2	15.5	17.2

表 7.3-86　TC11 钛合金比热容

θ/℃	300	400	500	600	700	800
c/J·kg^{-1}·K^{-1}	605	654	712	766	795	840

4）线胀系数见表 7.3-87。

表 7.3-87　TC11 钛合金线胀系数

θ/℃	20～100	20～200	20～300	20～400	20～500	20～600	20～700
α/10^{-6}K^{-1}	9.3	9.3	9.5	9.7	10.0	10.2	10.4

5）电阻率见表 7.3-88。

表 7.3-88　TC11 钛合金电阻率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
ρ/μΩ·m	1.71	1.85	1.89	1.92	1.95	2.02	1.99	1.94	1.92	1.90

6）磁性能　无磁性。

7）化学性能

① 抗氧化性能　优于 TC4 合金。

② 耐腐蚀性能　该合金具有良好的耐腐蚀性。与一些钛合金相仿，对热盐应力也存在着一定的敏感性。图 7.3-23 表明，TC11 钛合金试样（工作直径 5 mm，经表面化学抛光）喷涂 0.1 mg/cm^2 的 NaCl 后，在不同温度和应力下热暴露 100 h 后的室温拉伸塑性均有不同程度的降低。因此，零件处在热盐应力腐蚀的环境时，还应考虑这一限制因素。对零件表面进行阳极化处理能有效地提高该合金的抗热盐应力腐蚀能力。

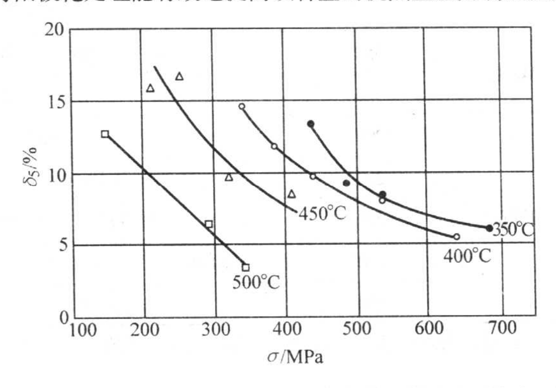


图 7.3-23　表面涂盐的 TC11 钛合金试样在不同温度和应力下暴露 100 h 后的室温拉伸塑性

3.3　相变及显微组织

1）相变温度　α＋β↔β 转变温度为 1 000℃ ± 20℃。

2）合金组织结构　合金在室温下的平衡组织主要含有 α 相和 β 相，还可能出现含量很少的硅化物及 Ti_3Al 相。在通常的退火状态下 β 相含量占 8%～12%。TC11 钛合金的加热－冷却－相组成见图 7.3-24。从 β 区（例如 1 030℃）快速冷却获得马氏体 α′，从较低温度（例如 900℃）快速冷却获得马氏体 α″、初生 α 和介稳定的 β 相。在 450℃以上加热时，α′或 α″将分解成 α 相和 β 相。

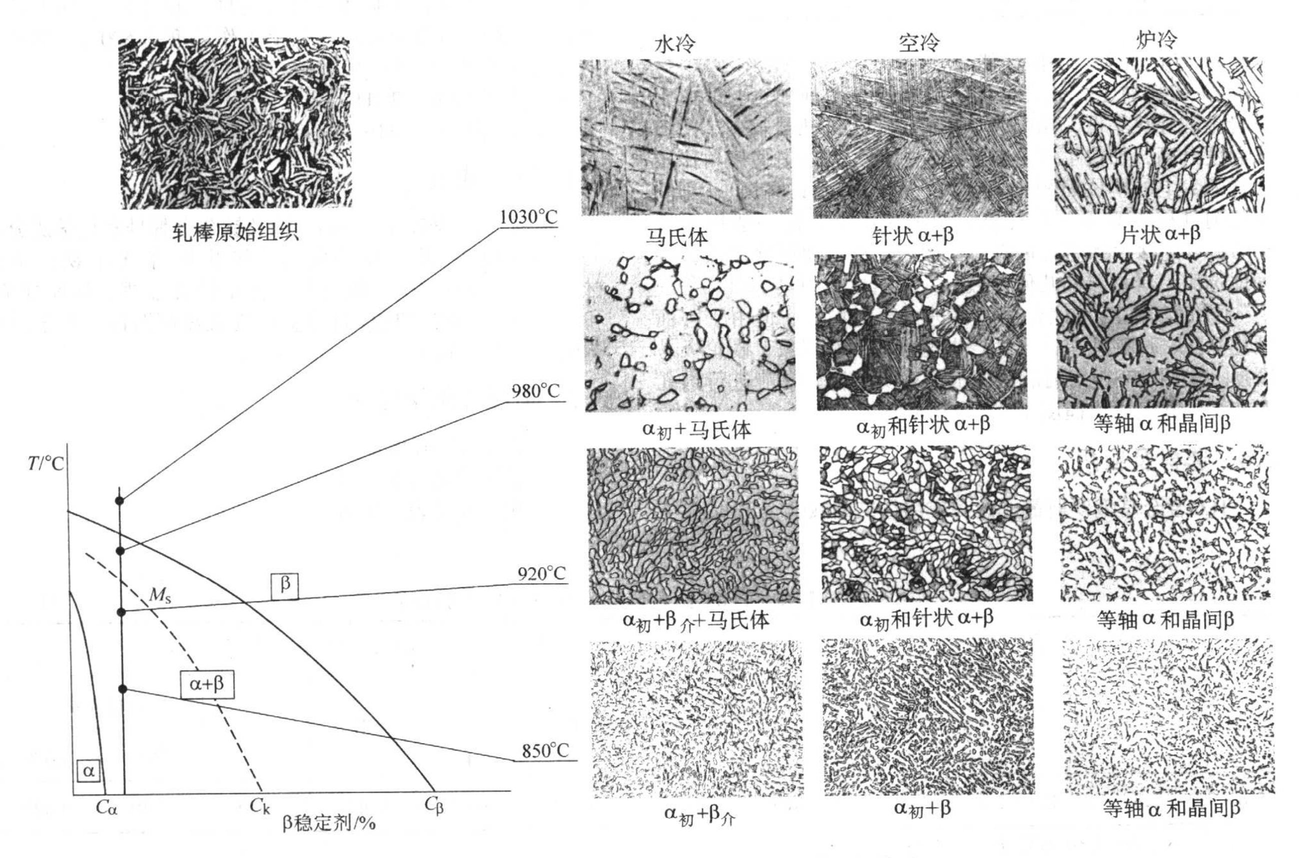


图 7.3-24　TC11 钛合金的温度－冷却速度－显微组织关系

TC11钛合金锻件常见的显微组织如图7.3-25，细晶的双态组织（Ⅰ）、网篮组织（Ⅱ）和粗针组织（Ⅲ）。

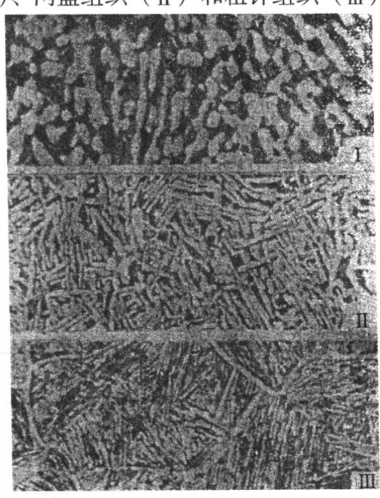


图7.3-25　两相钛合金在各种变形条件下所获得的显微组织类型

Ⅰ—等轴 $\alpha+\beta_{转}$；Ⅱ—网篮组织；Ⅲ—粗针组织

第Ⅰ种类型组织为等轴 $\alpha+\beta_{转}$，是均匀分布的混合组织，其中有初生α相（亮块）和 $\alpha+\beta$ 混合体的 $\beta_{转}$（暗块），这种组织是合金在（$\alpha+\beta$）区内，低于相变点30～50℃的温度进行变形时所获得的。

第Ⅱ种类型的网篮状组织是合金在β区加热并在（$\alpha+\beta$）区有足够大的变形时所形成的。初生α亮块呈片状，在其间分布着α和β的混合体（暗区）。这种组织的特点是在保留下来的不完整的原始β晶粒的轮廓中存在着网篮状编织的片状结构。

第Ⅲ种类型的组织是粗大的原始β晶粒和晶内的粗针或细针状组织。它或是由于合金在β区加热变形的结果，或是由于开坯时铸造组织在变形过程中破碎不完全而形成的。

研究工作表明：瞬时强度与组织的关系不明显，而塑性则不然，具有细晶组织的塑性比粗晶组织的高0.5～1.0倍，说明TC11钛合金的塑性对组织的敏感性比TC6钛合金要大。在500℃下100 h的持久强度以Ⅱ类组织最高（～665 MPa），Ⅰ类组织的最低（～605 MPa），Ⅲ类组织的居中（～625 MPa）；对疲劳极限（σ_{-1}）与温度的关系，随着组织Ⅰ类变化到Ⅲ类，室温疲劳极限也从605 MPa降到440 MPa（光滑试样）和从460 MPa降到325 MPa（缺口试样）。在500℃时看到相似的情况：光滑试样的疲劳极限从600 MPa降到400 MPa，而缺口试样的从333 MPa降至275 MPa，还发现TC11钛合金具有Ⅲ类组织时，无论是在室温还是在500℃下，其振动应力缺口敏感性最大。

3.4　力学性能

1）技术标准规定的性能见表7.3-89。

表7.3-89　TC11钛合金技术标准规定的性能

技术标准	品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	室温 σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	a_{KU}/kJ·mm^{-2}	HB（d/mm）
						不小于				
GB/T 2965—1996	棒材	≤90	双重退火①	L	≥1 030	900	10	25	—	—
GJB 494—1988	棒材	≤70		L	1 030～1 225	930	9	30	295	3.2～3.7
GJB 2218—1994	棒材	21～100		L	≥1 030	910	9	30	—	—
		>100～150		L	≥1 030	910	8	23	—	—
	饼坯、环坯	δ38～110		C	≥1 030	910	8	23	—	—
GJB 2220—1994	饼坯、环坯	δ38～110 m≤60 kg		C	1 060～1 230	910	8	23	295	3.2～3.7
GJB 2744—1996	锻件、模锻件	m≤60 kg		L②	≥1 030	910	8	23	295	3.2～3.7
HB 5263—1995	盘模锻件	—		C	1 030～1 230	885	8	23	295	3.2～3.7
HB 7238—1995	环形锻件	m≤60 kg		C	1 030～1 225	885	8	23	295	3.2～3.7
Q/6S 1130—1994	锻件	—	β热处理	L	1 030～1 225	885	6	12	340	3.2～3.7

技术标准	500℃ σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%	σ_{100}/MPa	σ_{35}/MPa	热稳定性③ σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%
			≥				≥	
GB/T 2965—1996	685	—	—	—	640④	—	—	—
GJB 494—1988	685	12	45	590	—	1 030	9	25
GJB 2220—1994	715	12	40	—	640④	1 060	8	20
GJB 2744—1996	715	12	40	—	640④	1 030	8	20
HB 5263—1995	685	12	40	—	640④	1 030	8	20
HB 7238—1995	685	12	40	—	640④	1 030	8	20

技术标准	520℃ σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%	σ_{100}/MPa	σ_{35}/MPa	350℃ σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%
Q/6S 1130—1994	685	9	25	590	785	8	23	735

① 棒材和饼坯均在切成试样后进行双重退火，而盘模锻件则在盘件双重退火后再切取试样。
② 采用横向或短横向试样测得的 δ_5 和 ψ 值允许比规定的纵向值低20%。
③ 热稳定试验方法是，最终机械加工成试样后，进行500℃，100 h热暴露然后进行室温拉伸。
④ 未满足 $\sigma_{35}\geq640$ MPa的要求时，可再用 $\sigma_{100}=590$ MPa测定，持久断裂时间超过100 h时仍作为合格。

2）室温及各种温度下的力学性能

① 硬度　室温硬度27～30HRC；硬度HB见表7.3-90。

表7.3-90　TC11钛合金室温硬度

品种	d/mm	状态	硬度HB
棒材	18～45	双重退火	343
饼、环坯	—		326
盘模锻件	—		331

② 拉伸性能　试验温度对棒材拉伸性能的影响见图7.3-26～图7.3-29。

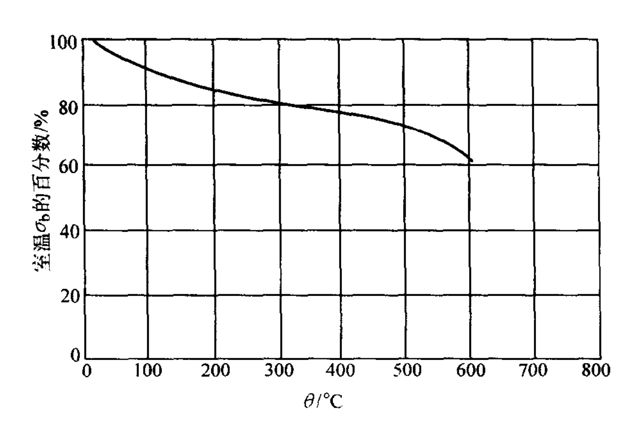


图7.3-26　试验温度对TC11钛合金棒材抗拉强度的影响

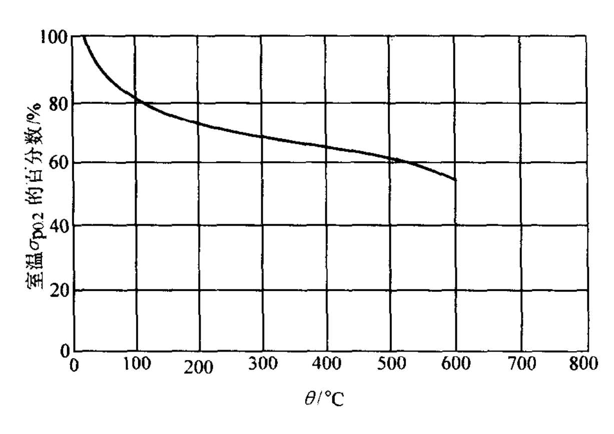


图7.3-27　试验温度对TC11钛合金棒材屈服强度的影响

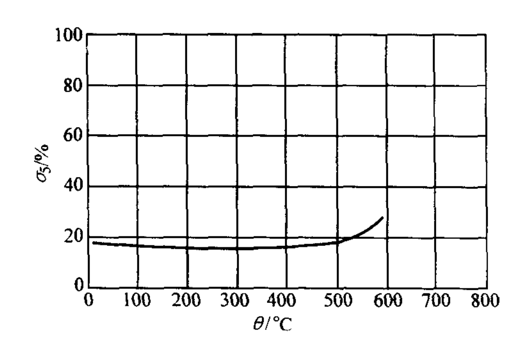


图7.3-28　试验温度对TC11钛合金棒材断后伸长率的影响

试验温度对盘模锻件拉伸性能的影响见图7.3-30～图7.3-33。

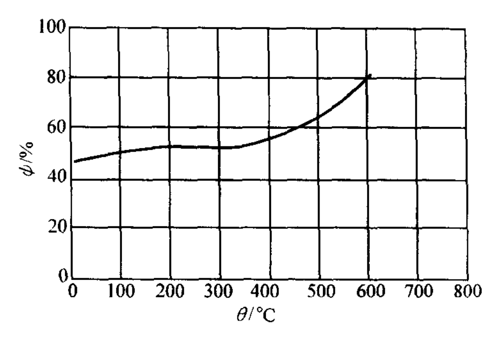


图7.3-29　试验温度对TC11钛合金棒材断面收缩率的影响

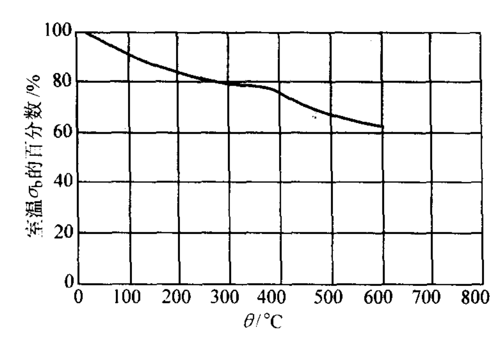


图7.3-30　试验温度对TC11钛合金盘模锻件抗拉强度的影响

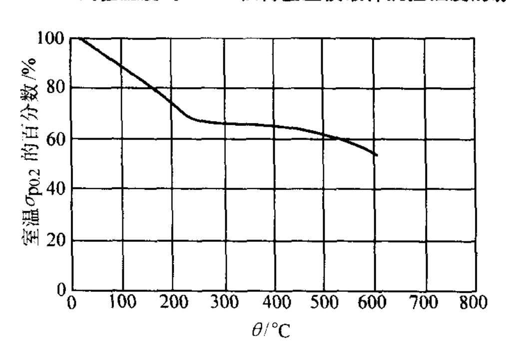


图7.3-31　试验温度对TC11钛合金盘模锻件屈服强度的影响

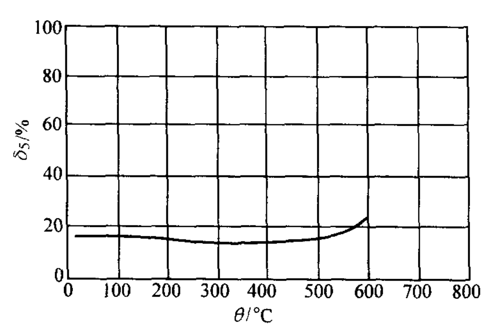


图7.3-32　试验温度对TC11钛合金盘模锻件断后伸长率的影响

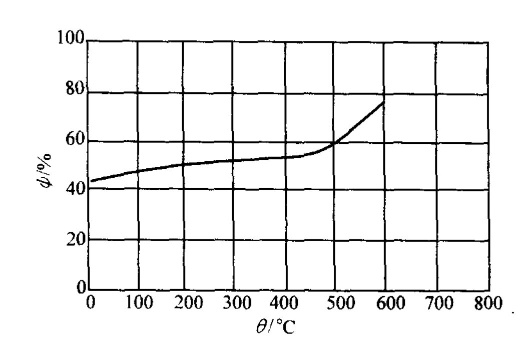


图7.3-33　试验温度对TC11钛合金盘模锻件断面收缩率的影响

各种温度下的拉伸性能见表 7.3-91。

表 7.3-91 TC11 钛合金各种温度下的拉伸性能

品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
棒材	20	双重退火	L	20	1 114	1 014	17.6	52.1
				100	1 030	920	16.8	47.1
				200	943	796	18.0	50.2
				300	843	652	18.8	48.0
				400	809	633	17.2	51.7
				450	804	616	22.0	58.0
				500	780	593	22.4	59.0
				550	739	579	25.6	65.0
				600	637	544	32.5	71.5
				700	378	298	65.0	80.0
				800	188	153	115.3	97.5
饼坯	400×83	双重退火	C	20	1 079	968	16.0	44.2
				350	866	669	15.6	53.4
				450	823	623	18.3	58.8
				500	788	604	20.2	65.7
环坯	460/250×90	双重退火	C	20	1 074	—	16.6	46.6
				350	834	—	14.3	50.6
				450	799	—	17.1	57.2
				500	786	—	19.9	63.3
盘模锻件	500×62	双重退火	C	20	1 066	—	16.2	42.6
				350	806	—	17.8	48.6
				450	759	—	15.0	52.8
				500	773	—	17.3	53.6

饼坯和盘模锻件不同部位和取向的室温拉伸性能见表 7.3-92。

表 7.3-92 TC11 钛合金饼坯和盘模锻件不同部位和取向的室温拉伸性能

品种	状态	部位	δ/mm	取样方向	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ/%
饼坯	双重退火	外缘	83	C	1 089	968	16.0	44.2
				R	1 073	951	17.0	43.2
				轴向	1 090	959	11.8	42.0
盘模锻件	双重退火	轮缘	62	C	1 062	966	16.3	43.8
				R	1 062	941	14.9	49.1
				轴向	1 068	957	10.9	38.6
		轮辐	20	C	1 067	979	12.5	40.0
				R	1 069	967	13.1	49.3
		轮毂	62	C	1 091	941	15.5	47.4
				轴向	1 072	947	12.3	47.8

棒材的拉伸应力－应变曲线见图 7.3-34。

③ 压缩性能　棒材的压缩屈服强度见表 7.3-93。

棒材的压缩应力－应变曲线见图 7.3-35。

④冲击性能　室温冲击韧度见表 7.3-94。

⑤ 扭转与剪切性能　棒材的扭转性能见表 7.3-95。

棒材的室温剪切性能见表 7.3-96。

⑥ 应力集中性能见表 7.3-97。

⑦ 热稳定性　棒材试样热暴露后的室温拉伸性能见表 7.3-98。

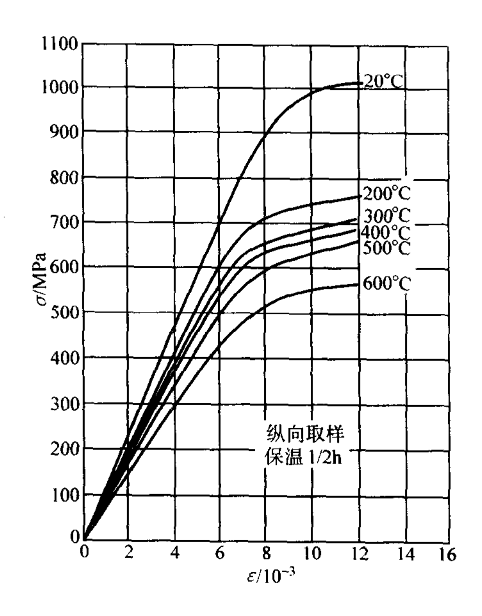


图 7.3-34 TC11 钛合金棒材的拉伸应力－应变曲线

表 7.3-93 TC11 钛合金棒材的压缩屈服强度

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	$\sigma_{pc0.2}$
棒材	22	双重退火	L	20	1 062
				300	732
				500	645

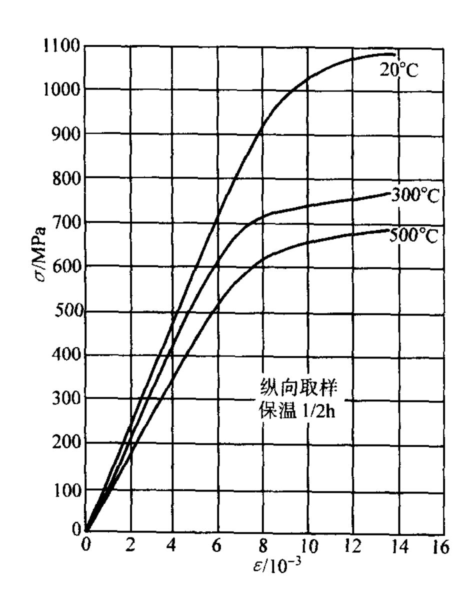


图 7.3-35 TC11 钛合金棒材的压缩应力－应变曲线

表 7.3-94 TC11 钛合金室温冲击韧度

品种	d/mm	状态	取样方向	a_{KU}/kJ·m^{-2}
棒材	18～45	双重退火	L	592
盘模锻件	—		C	560
叶片	—		L	500

表 7.3-95 TC11 钛合金扭转性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	τ_b /MPa	$\tau_{P0.3}$ /MPa	$\tau_{P0.0.1}$ /MPa	扭转角 /(°)
棒材	20	双重退火	L	20	980	739	659	460
	22		L	20	975	678	—	—
				300	821	482	—	—
				500	723	422	—	—

表 7.3-96 TC11 钛合金室温剪切性能

品种	d/mm	状态	取样方向	τ/MPa
棒材	20	双重退火	L	730

表 7.3-97 TC11 钛合金应力集中性能

品种	d 或 δ /mm	状态	部位	取样方向	K_t	θ/℃	σ_{bH}	σ_{bH}/σ_b
棒材	20	双重退火	中心	L	3	20	1 765	1.56
						300	1 331	1.44
						350	1 314	1.44
						400	1 275	1.42
						450	1 272	1.45
						500	1 255	1.45
						550	1 226	1.55
饼坯	400×83	双重退火	外缘	C	3	20	1 574	1.45
						350	1 202	1.39
						500	1 106	1.40
盘模锻件	500×62	双重退火	轮缘	C	3	20	1 660	1.56
						350	1 186	1.47
						450	1 138	1.50
						500	1 108	1.43

表 7.3-98 TC11 钛合金棒材试样热暴露后的室温拉伸性能

品种	d /mm	状态	取样方向	热暴露条件 θ/℃	σ/MPa	t/h	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
棒材	20	双重退火	L	未暴露			1 144	1 043	16.8	48.1
				300	0	100	1 131	1 023	15.9	48.7
				400	0	100	1 138	1 020	15.8	49.9
				500	0	100	1 170	—	13.9	44.7
				500		300	1 183	1 115	15.0	39.6
				500		500	1 187	1 125	14.7	36.2
				500		800	1 183	1 131	13.7	34.0
				500		1 000	1 183	1 144	12.8	23.3
				550		100	1 151	—	13.9	37.2
				500	294	100	1 174	1 086	15.3	42.9
				500	372	100	1 160	1 093	14.6	42.5
				500	294	500	1 174	1 091	14.8	35.8
				500	372	500	1 167	1 044	15.6	37.5

棒材试样经 500℃，100 h 热暴露后的室温冲击韧度 a_{KU} = 511 kJ/m² (未暴露的 a_{KU} = 576 kJ/m²)。

叶片试样热暴露后的室温拉伸性能见表 7.3-99。

饼坯和盘模锻件试样热暴露后的室温拉伸性能见表 7.3-100。

3) 持久和蠕变性能

表 7.3-99 TC11 钛合金叶片试样热暴露后的室温拉伸性能

品种	状态	部位	取样方向	热暴露条件 θ/℃	t/h	σ_b① /MPa	δ_5 %	ψ %
叶片	双重退火	榫头	LT	未暴露		1 111	16.9	52.1
				500	100	1 111	17.9	46.1
					500	1 145	15.8	32.6
					1 000	1 131	11.4	19.8
		叶身	L	未暴露		1 104	15.9	50.0
				500	100	1 146	15.3	44.1
					500	1 188	14.2	21.6
					1 000	1 163	12.0	20.3

① 拉伸试样的工作直径 d = 3 mm。

表 7.3-100 TC11 钛合金饼坯和盘模锻件试样热暴露后的室温拉伸性能

品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	热暴露条件 θ/℃	σ/MPa	t/h	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
饼坯	400×83	双重退火	C	未暴露			1 103	967	16.0	44.2
				500		100	1 082	982	17.1	45.7
						500	1 109	1 012	13.2	26.8
						2 000	1 099	1 038	13.2	21.1
				500	343	100	1 097	1 002	14.2	39.5
盘模锻件	500×62	双重退火	C	未暴露			1 062	959	15.8	45.0
				500	0	100	1 074	—	17.5	41.3
						500	1 063	997	16.3	36.5
				未暴露			1 066	—	16.2	42.6
				500	343	100	1 066	—	13.9	41.0

① 高温持久性能 棒材的高温持久性能见表 7.3-101。

表 7.3-101 TC11 钛合金棒材的高温持久性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_{100}/MPa	σ_{300}/MPa	σ_{100H}①/MPa
棒材	20	双重退火	L	300	912	—	—
				350	912	—	1 285
				400	902	—	1 275
				450	834	—	1 177
				500	647	—	981
				550	373		539
	22		L	450	856	811	—
				500	672	578	—
				550	406	310	—

① 缺口持久试样 K_t = 2.5。

棒材不同温度的持久应力 - 寿命曲线见图 7.3-36。

② 高温蠕变性能 棒材、饼坯和盘模锻件的高温蠕变性能见表 7.3-102。

棒材 0.1%塑性应变的蠕变应力 - 寿命曲线见图 7.3-37。

棒材 0.2%塑性应变的蠕变应力 - 寿命曲线见图 7.3-38。

4) 疲劳性能

① 高周疲劳 旋转弯曲疲劳极限见表 78.3-103。

轴向加载疲劳极限见表 7.3-104。

棒材光滑试样室温轴向加载疲劳 S-N 曲线见图 7.3-39。

棒材缺口试样室温轴向加载疲劳 S-N 曲线见图 7.3-40。

棒材光滑和缺口试样的 500℃轴向加载疲劳 S-N 曲线见图 7.3-41。

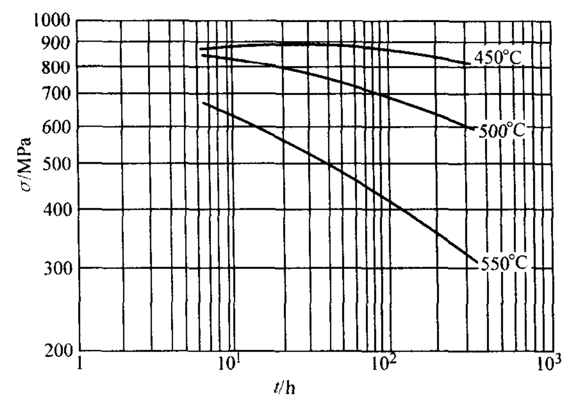


图 7.3-36 TC11 钛合金棒材不同温度的持久应力-寿命曲线

材料品种：棒材
材料规格：ϕ22 mm
热处理状态：950℃，1 h，空冷 + 530℃，6 h，空冷
取样方向：L
炉批数：3
试样数：87
持久方程［L-M］：

$$\lg t = b_0 + b_1/T + b_1 x/T + b_3 x^2/T + b_4 x^3/T$$

式中：$T = (9\times\theta/5+32)+460$
$x = \lg\sigma$
$b_0 = -17.443$
$b_1 = 0.415\times10^6$
$b_2 = -0.470\times10^6$
$b_3 = 0.192\times10^6$
$b_4 = -0.262\times10^5$
标准偏差：0.02
相关系数：0.978

表 7.3-102 TC11 钛合金棒材、饼坯和盘模锻件的高温蠕变性能

品种	d 或 δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	$\sigma_{0.1/100}$/MPa	$\sigma_{0.2/100}$/MPa	$\sigma_{0.2/200}$/MPa	$\sigma_{0.2/500}$/MPa	$\sigma_{0.5/100}$/MPa
棒材	20	双重退火	L	400	—	579	—	—	—
				450	—	490	—	—	—
				500	—	422	382	275	—
	22		L	450	428	484	—	—	557
				500	249	310	—	—	411
				550	110	155	—	—	243
饼坯	400×83		C	350	—	613	—	—	—
				450	—	510	—	—	—
				500	—	441	—	—	—
盘模锻件	520×83		C	500	—	402	—	—	—

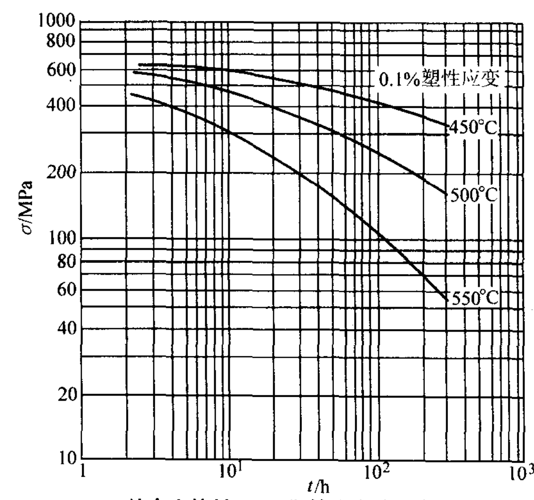


图 7.3-37 TC11 钛合金棒材 0.1%塑性应变的蠕变应力-寿命曲线

材料品种：棒材
材料规格：ϕ22 mm
取样方向：L
热处理状态：950℃，1 h，空冷 + 530℃，6 h，空冷
炉批数：3
试样数：61
0.1%总塑性应变蠕变方程［L-M］：

$$\lg t = b_0 + b_1/T + b_2 x/T + b_3 x^2/T + b_4 x^3/T$$

式中：$T = (9\times\theta/5+32)+460$
$x = \lg\sigma$
$b_0 = -10.239$
$b_1 = 0.968\times10^5$
$b_2 = -0.106\times10^6$
$b_3 = 0.486\times10^5$
$b_4 = -0.755\times10^4$
标准偏差：0.036
相关系数：0.96

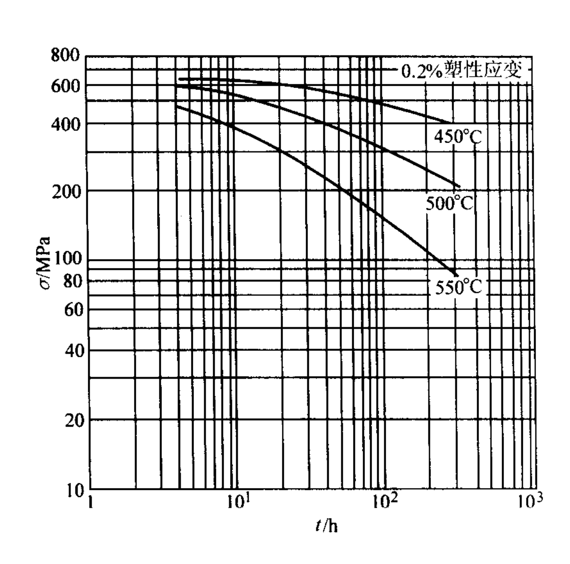


图 7.3-38 TC11 钛合金棒材 0.2%塑性应变的蠕变应力－寿命曲线

材料品种：棒材
材料规格：ϕ22 mm
热处理状态：950℃，1 h，空冷＋530℃，6 h，空冷
取样方向：L
炉批数：3
试样数：61
0.2%总塑性应变蠕变方程［L-M］：

$lgt = b_0 + b_1/T + b_2x/T + b_3x^2/T + b_4x^3/T$

式中：$T = (9\times\theta/5+32)+460$

$x = \lg\sigma$

$b_0 = -9.950$

$b_1 = 0.968\times10^6$

$b_2 = -0.106\times10^6$

$b_3 = 0.486\times10^5$

$b_4 = -0.755\times10^4$

标准偏差：0.036
相关系数：0.96

表 7.3-103 TC11 钛合金旋转弯曲疲劳极限

品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	N/周	σ_D /MPa
棒材	20	双重退火	L	20	1 2	-1	10^7	490 333
				500	1 2	-1	10^7	412 294
饼坯	400×83		C	500	1 2	-1	10^7	441 294
环坯	460/225×90		C	500	1 2	-1	10^7	441 255
盘模锻件	520×92		C	20	1 2	-1	10^7	451 275
				20 500	1① 1①			539 490

① 试样工作直径 $d = 4$ mm。

表 7.3-104 TC11 钛合金轴向加载疲劳极限

品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	N/周	σ_D /MPa
棒材	22	双重退火	L	20	1	0.5 0.1 -1	10^7	958 820 549
				500	1	-1	10^7	438
				20	3	0.5 0.1 -1	10^6	336 236 158
				500	3	-1	10^7	152
饼坯	400×83	双重退火	C	20	1 3	-1	10^7	460 209
				500	1	-1	10^7	417
环坯	460/225×90	双重退火	C	20	1	-1	10^7	480

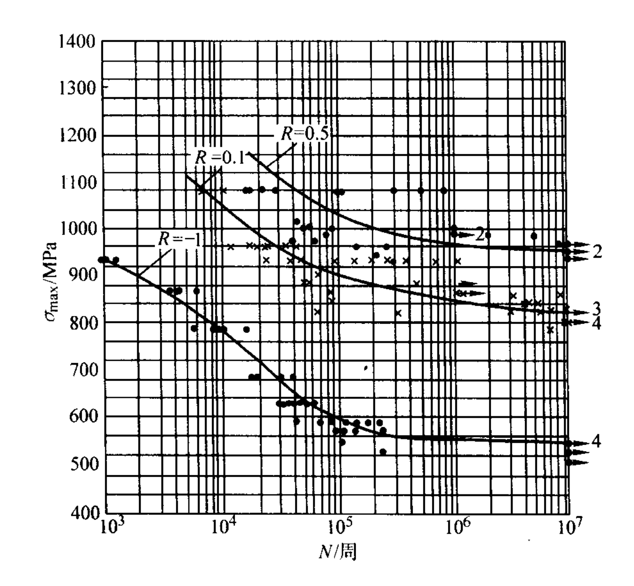


图 7.3-39 TC11 钛合金棒材光滑试样（$K_t=1$）室温轴向加载疲劳 S-N 曲线

材料品种：棒材
材料规格：ϕ22 mm
热处理状态：950℃，1 h，空冷＋530℃，6 h，空冷
材料强度：σ_b = 1 133 MPa，$\sigma_{p0.2}$ = 1 024 MPa
取样方向：L
试样尺寸：d = 5 mm
加载方式：轴向
试验频率：0.5，130 Hz
试验环境：20℃，空气
炉批数：3
试样数：141
等效应力方程：$\lg N = 22.36 - 7.01\lg(\sigma_{eq} - 549)$

$\sigma_{eq} = \sigma_{max}(1-R)^{0.4}$

② 低周疲劳 饼坯和盘模锻件的应力控制低周疲劳性能见表 7.3-105。

棒材室温应变控制低周疲劳性能及 ε-N 曲线见表 7.3-106 和图 7.3-42。

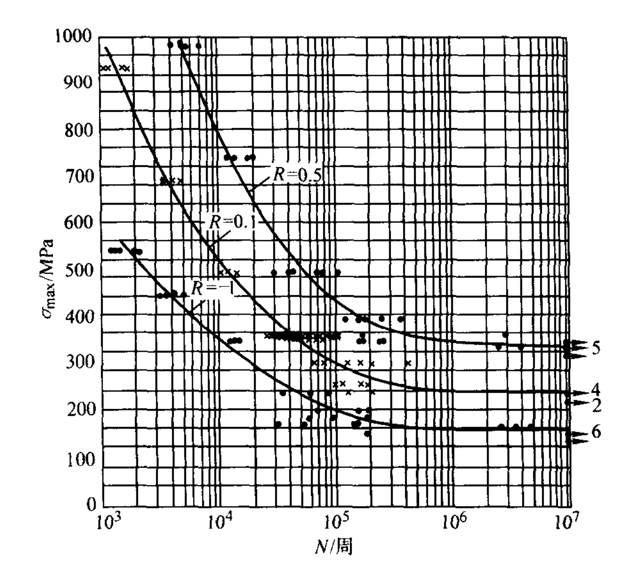


图 7.3-40　TC11 钛合金棒材缺口试样（$K_t=3$）室温轴向加载疲劳 S-N 曲线

材料品种：棒材
材料规格：ϕ22 mm
热处理状态：950℃，1 h，空冷 + 530℃，6 h，空冷
材料强度：$\sigma_b = 1\ 133$ MPa，$\sigma_{p0.2} = 1\ 024$ MPa
取样方向：L
试样尺寸：$d = 5$ mm
加载方式：轴向
试验频率：0.5，130 Hz
试验环境：20℃，空气
炉批数：3
试样数：162
等效应力方程：$\lg N = 12.15 - 3.23\lg(\sigma_{eq} - 158)$
$\sigma_{eq} = \sigma_{max}(1 - R)^{0.57}$

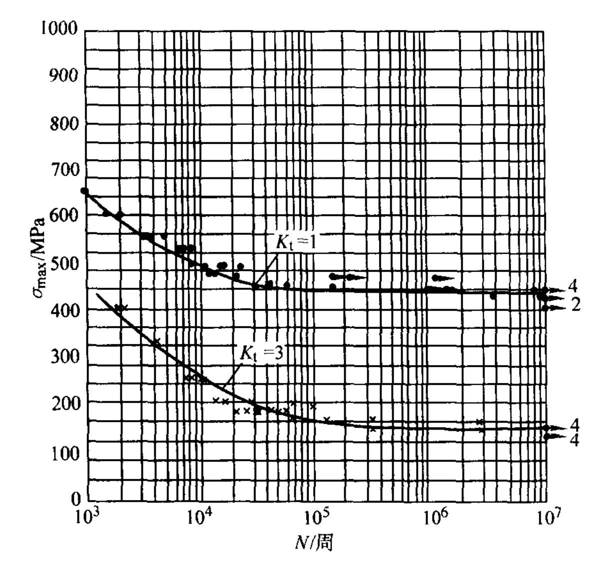


图 7.3-41　TC11 钛合金棒材光滑和缺口试样 500℃轴向加载疲劳 S-N 曲线

材料品种：棒材
材料规格：ϕ22 mm
热处理状态：950℃，1 h，空冷 + 530℃，6 h，空冷
材料强度：
20℃：$\sigma_b = 1\ 133$ MPa，$\sigma_{p0.2} = 1\ 024$ MPa
500℃：$\sigma_b = 837$ MPa，$\sigma_{p0.2} = 641$ MPa
取样方向：L
试样尺寸：$d = 5$ mm
加载方式：轴向
应力比：-1
试验频率：0.5，130 Hz
试验环境：500℃，空气
炉批数：3
试样数：101

表 7.3-105　TC11 钛合金饼坯和盘模锻件的应力控制低周疲劳性能

品种	d 或 δ /mm	状态	θ/℃	K_t	R	f /Hz	K	σ_{max} /MPa	N/周
饼坯	400 × 83	双重退火	20	2.4	0.1	0.17	0.9	1 289	246
							0.8	1 145	772
							0.7	1 002	1 395
							0.5	716	5 046
			500	2.4	0.1	0.5	0.7	686	1 780
盘模锻件	500 × 92	双重退火	20	2.4	0.1	0.17	~0.7	1 000	1 613
							~0.5	716	6 658
			500	2.4	0.1		~0.7	664	1 493
							~0.5	490	5 034

表 7.3-106　TC11 钛合金棒材室温应变控制低周疲劳性能

材料品种	棒材	试样尺寸	$d = 6.35$ mm
材料规格	$d = 20$ mm	加载波形	三角波
取样方向	L	应变比	-1
试验温度	20℃	试验频率	0.167 ~ 0.333 Hz
控制方式	轴向应变	失效判据	断裂
热处理状态	950℃，1 h，空冷 + 530℃，6 h，空冷		

稳态迟滞回线特征				$2N_f$/周	试样数量/根
$\Delta\varepsilon_t/2$	$\Delta\varepsilon_e/2$	$\Delta\varepsilon_p/2$	$\Delta\sigma/2$		
%			/MPa		
1.200	0.750	0.450	917	746	1
1.000	0.680	0.320	841	1 096	3
0.800	0.680	0.120	829	3 808	3
0.700	0.660	0.040	808	5 896	3
0.600	0.580	0.020	706	24 360	2
0.500	0.490	0.010	602	73 272	3

续表 7.3-106

稳态迟滞回线特征				$2N_f$/周	试样数量/根	
$\Delta\varepsilon_t/2$	$\Delta\varepsilon_e/2$	$\Delta\varepsilon_p/2$	$\Delta\sigma/2$ /MPa			
%						
应变疲劳参数	σ'_f/MPa	b	ε'_f/%	c	K'/MPa	n'
	1 578	−0.08	112	−0.85	1 493	0.09
曲线的数学表达式	$\Delta\varepsilon_t/2=0.013\ (2N_f)^{-0.08}+1.12\ (2N_f)^{-0.85}$					
	$\Delta\sigma/2=1\ 493\ (\Delta\varepsilon_p/2)^{0.09}$					

棒材500℃应变控制低周疲劳性能及 ε-N 曲线见表 7.3-107 和图 7.3-43。

棒材不同温度的循环应力－应变曲线见图 7.3-44。

5）弹性性能

① 弹性模量见表 7.3-108。

② 剪切弹性模量　室温剪切弹性模量 $G=43$ GPa。

③ 泊松比　室温泊松比 $\mu=0.33$。

6）断裂性能

① 断裂韧度　室温断裂韧度见表 7.3-109。

② 应力腐蚀断裂韧度见表 7.3-110。

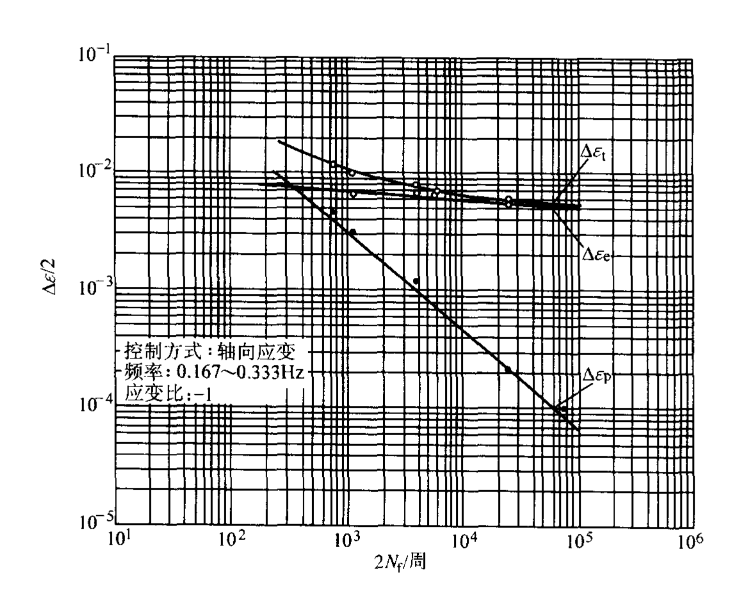


图 7.3-42　TC11 钛合金棒材室温低周疲劳 ε-N 曲线

表 7.3-107　TC11 钛合金棒材 500℃应变控制低周疲劳性能

材料品种	棒材	试样尺寸	$d=6.35$ mm		
材料规格	$d=20$ mm	加载波形	三角波		
取样方向	L	应变比	−1		
试验温度	500℃	试验频率	0.167～0.333 Hz		
控制方式	轴向应变	失效判据	断裂		
热处理状态	950℃，1 h，空冷＋530℃，6 h，空冷				
稳态迟滞回线特征				$2N_f$/周	试样数量/根
$\Delta\varepsilon_t/2$	$\Delta\varepsilon_e/2$	$\Delta\varepsilon_p/2$	$\Delta\sigma/2$ /MPa		
%					
1.200	0.648	0.552	638	754	1
1.000	0.610	0.390	601	1 556	3
0.800	0.578	0.222	569	3 276	3
0.700	0.561	0.139	552	4 562	3
0.600	0.528	0.072	521	7 520	3
0.500	0.466	0.034	459	25 044	3
0.400	0.379	0.021	374	51 356	3
0.350	0.329	0.021	324	66 636	2

应变疲劳参数	σ'_f/MPa	b	ε'_f/%	c	K'/MPa	n'
	1 723	−0.14	112	−0.79	1 617	0.17
曲线的数学表达式	$\Delta\varepsilon_t/2=0.018\ (2N_f)^{-0.14}+1.12\ (2N_f)^{-0.79}$					
	$\Delta\sigma/2=1\ 617\ (\Delta\varepsilon_p/2)^{0.17}$					

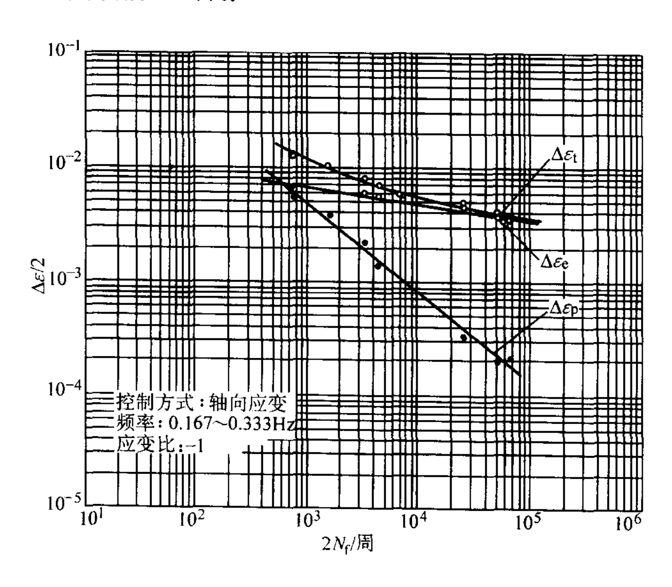


图 7.3-43　TC11 钛合金棒材 500℃低周疲劳 ε-N 曲线

③ 疲劳裂纹扩展速率　盘模锻件室温 $da/dN-\Delta K$ 曲线见图 7.3-45。

3.5 制造工艺和性能

1）热处理制度

① 双重退火　950℃，1～2 h，空冷＋530℃，6 h，空冷。首次退火温度允许在β相变点以下 30～50℃范围内作适当调整。首次退火保温时间根据最大截面厚度来确定：25 mm以下为 1 h；26～50 mm 为 1.5 h；51～75 mm 为 2 h。

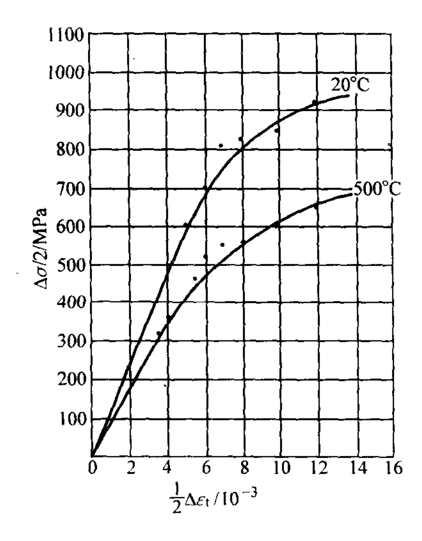


图 7.3-44 TC11 钛合金棒材不同温度的循环应力－应变曲线

表 7.3-108 TC11 钛合金弹性模量

品种	棒材								
状态	双重退火								
θ/℃	20	100	200	300	400	450	500	550	600
E/GPa	123	119	114	110	104	—	99	—	94
E_D/GPa	133	—	—	—	115	112	109	106	—

表 7.3-109 TC11 钛合金室温断裂韧度

品种	d 或 δ/mm	状态	试样类型	取样方向	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$
盘模锻件	500×62	双重退火	CT	C-R	72.4
梁模锻件	36×140×560		CT	L-T	76.2

表 7.3-110 TC11 钛合金应力腐蚀断裂韧度

品种	状态	取样方向	环境条件	K_{ISSC}/MPa·m$^{1/2}$	K_{ISSC}/K_{IC}
锻件	双重退火	L-T	3.5%NaCl 溶液，35℃，pH=6.0~7.0	56.3	0.73

② 去应力退火 530~580℃，0.5~6 h，空冷或炉冷。

③ β热处理 又称 BRCT 热处理，采用该工艺进行热处理不仅能提高 TC11 钛合金的断裂韧度、蠕变抗力、高温持久和疲劳裂纹扩展抗力，而且具有能满足使用要求的室温拉伸塑性和疲劳强度。β热处理制度：β相变点以上 20~30℃，0.5 h，油冷＋950℃±10℃，1~2 h，空冷＋550℃±10℃，6~7 h，空冷。

④ 零件热处理注意事项 在实际零件（特别是大截面锻件）的双重退火工艺中，要注意首次退火的空冷条件，不允许堆冷或抽底式炉底上空冷，以免由于冷却速度过慢而影响组织性能（特别是降低拉伸强度）。

2）热变形工艺和性能

① 热变形工艺塑性 热变形温度下的抗拉强度和断后伸长率见表 7.3-111。

锻造温度下的冲击韧度见表 7.3-112。

允许的最大镦粗变形程度见表 7.3-113。

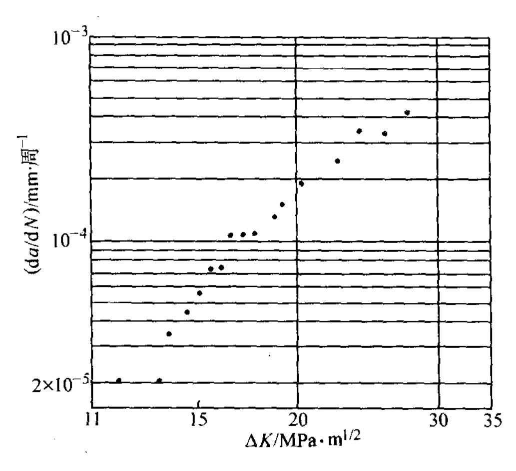


图 7.3-45 TC11 钛合金盘模锻件室温 da/dN－ΔK 曲线

材料品种：盘模锻件

材料规格：φ500 mm×62 mm

热处理状态：950℃，2 h，空冷＋530℃，6 h，空冷

材料强度：σ_b = 1 033 MPa，$\sigma_{p0.2}$ = 935 MPa

取样方向：C-R

试样类型：CT，B = 20 mm，W = 80 mm

加载方式：轴向

应力比：0.1

试验频率：13.3 Hz

试验环境：20℃，空气

试样个数：1

试验点数：16

拟合公式：$da/dN = C\ (\Delta K)^n$

式中，$C = 1.34\times10^{-9}$

$n = 3.89$

表 7.3-111 TC11 钛合金热变形温度下的抗拉强度和断后伸长率

品种	d/mm	状态	拉伸速度/10^{-4}m·s^{-1}	θ/℃	σ_b/MPa	δ_5/%
棒材	20	热轧	3.3	800	178	206
				850	126	311
				900	89	723
				950	59	203
				1 000	34	237
			0.8	700	298	256
				800	94	303
				850	—	403
				900	—	1 020
				950	—	1 109
				1 000	—	352
				1 050	—	222

表 7.3-112 TC11 钛合金锻造温度下的冲击韧度

品种	d/mm	状态	θ/℃	a_{KU}/kJ·m^{-2}
棒材	22	热轧	700	664
			750	1 049
			800	1 814
			850	3 089
			900	2 873

② 热变形工艺规范见表 7.3-114。

表 7.3-113 TC11 钛合金允许的最大镦粗变形程度

品种	d/mm	状态	θ/℃	ε/%	
				落锤	液压机
铸锭	580	铸造	800	10	—
			900	20	—
			1 000	50	—
			1 100	80	—
			1 200	60	—
棒材	22	热轧	700	30	>80
			800	>80	>80
			900	>80	>80
			1 000	>80	>80
			1 100	>80	>80

表 7.3-114 TC11 钛合金热变形工艺规范

热变形类型	加热温度/℃	终止温度/℃	一火变形量/%
铸锭开坯	1 100~1 200	≥900	30~60
坯料锻造	950~980	≥800	40~65
压力机模锻	950~970	≥800	40~65
锻锤模锻	960~980	≥850	40~65

3）焊接工艺和性能

① 该合金可应用于焊接结构。熔焊时必须采用惰性气体（氩、氦）或真空方法来保护。焊缝应没有氧化色或浅黄色。

② 由于该合金对焊接的热循环反应较大，因此要求采用一些专门的热处理，这不仅为了消除残余应力，而且主要为了使焊缝和焊缝邻近区金属的组织性能稳定化。一般都推荐焊后进行退火并空冷或炉冷。退火是在真空炉或惰性气体的容器中进行，不允许用火焰喷枪来退火。

③ 氩弧焊　接头和基体材料的室温力学性能见表 7.3-115。

表 7.3-115 TC11 钛合金氩弧焊接头和基体材料的室温力学性能

焊接工艺	状态	部位	σ_b/MPa	a_{KU}/kJ·m^{-2}
氩弧焊	双重退火	基体材料	1 162	510
		接头	1 025	392

④ 电子束焊接　焊接接头（板材）的性能与退火温度的关系见表 116。

表 7.3-116 TC11 钛合金不同退火温度的焊接接头性能

品种	焊接方法	退火制度	σ_b/MPa	a_{KU}/kJ·m^{-2}	α/(°)	R	σ_D/MPa		σ^{500}_{100}/MPa
							20℃	500℃	
板材（δ10~12 mm）	电子束焊接接头	600℃，1 h，空冷	1 093~1 152	148~167	10~14	-1	296~345	276	621
		750℃，1 h，空冷	1 024~1 064	118~197	12~17	-1	222	197	591
		850℃，1 h，空冷	1 024~1 064	197~364	20~23	-1	172	—	591
		950℃，1 h，空冷 +530℃，4 h，空冷	1 152~1 172	267~296	30~37	-1	246	—	611

3.6 选材及应用

TC11 钛合金是 Ti-Al-Mo-Zr-Si 系的两相热强钛合金，具有较高的铝当量 $[Al]_{eq}$（7.8）和 3.5 的钼当量 $[Mo]_{eq}$，两者良好的配合，使合金既具备在 500℃下很好的高温性能，又有满意的工艺性能和热稳定性，主要应用在航空发动机压气机的零部件，如叶片、盘件、鼓筒和轴类等。也可以制成异形铸件，制件的使用工作条件为，在退火状态可用于 500℃以下 500 h 和 550℃以下 100 h 以及 450℃以下 1 000 h，在强化处理状态可用于 500℃以下 100 h 工作的零件和在 700℃以下一次性工作的零件。这几年来 TC11 钛合金是我国发动机中用量最多的钛合金。

在高速旋转的 TC11 叶片和盘件等转动件，无论国内或国外均要求由采用三次真空自耗熔炼的锭子，或者采用包括有一次冷炉床熔炼的锭子锻造而成。原材料海绵钛电极及铸锭的焊接不得采用钨极氩弧焊，以尽量减少金属或非金属夹杂的引入。

4 TC16 钛合金

TC16 合金是一种马氏体型 α-β 两相钛合金，其名义成分为 Ti-3Al-5Mo-4.5V，含有 α 稳定元素 Al 和同晶型 β 稳定元素 Mo 和 V。该合金的 β 稳定系数稍高，$K_\beta=0.8$，退火状态的强度中等，塑性则非常好，可以像 β 合金一样用来冷镦制造铆钉及螺栓。TC16 合金可进行强化热处理，而且真空固溶处理的温度仅为 800℃，比 TC4 合金要低 150℃。该合金经固溶时效处理后的强度可达 1 030 MPa 以上，属高强度钛合金，而且对于缺口、偏斜等的应力集中敏感性较小。TC16 合金主要用于制造紧固件，最高工作温度是 350℃。该合金的半成品主要有热轧棒材和冷镦用磨光棒（线）材。

1）材料牌号 TC16。

2）相近牌号 BT16（俄罗斯）。

4.1 化学成分

XJ/BS 5156—2001《航空用 TC16 钛合金棒（线）材》规定的化学成分见表 7.3-117。

表 7.3-117 TC16 钛合金的化学成分（质量分数）　%

合金元素				杂质≤								
Al	Mo	V	Ti	Fe	Si	Zr	C	N	H	O	其他元素③	
											单个	总和
2.2~3.8①	4.5~5.5	4.0~5.0	余量	0.25	0.15	0.30	0.10	0.05	0.012②	0.15	0.10	0.30

① 用于制造铆钉的棒（线）材应在合同中注明，其 Al 含量应为 1.8%~3.4%。

② 冷镦用棒（线）材 H≤0.010%。

③ 产品出厂时供方可不检验其他元素，用户要求并在合同中注明时可予以检验。

4.2 物理及化学性能

1) 密度 $\rho=4.68$ g/cm³。

2) 热导率见表7.3-118。

表 7.3-118 TC16钛合金的热导率

θ/℃	100	200	300	400	500	600	700	800	900
λ" /W·m⁻¹·K⁻¹	10.9	12.1	13.4	14.6	15.9	16.7	18.0	19.6	21.3

3) 比热容见表7.3-119。

表 7.3-119 TC16钛合金的比热容

θ/℃	100	200	300	400	500	600	700	800	900
c/J·kg⁻¹·K⁻¹	461	503	545	587	670	712	796	838	880

4) 线胀系数见表7.3-120。

表 7.3-120 TC16钛合金的线胀系数

θ/℃	20~100	20~200	20~300	20~400	20~500	100~200	200~300	300~400	400~500
α/10⁻⁶K⁻¹	9.1	9.4	9.7	9.9	10.0	9.8	10.4	10.5	10.3

5) 电阻率 室温电阻率 $\rho=1.11$ μΩ·m。

6) 磁性能 无磁性。

7) 抗氧化性能 参看TC4钛合金。

8) 耐腐蚀性能 合金在大气条件下和海水中稳定。耐腐蚀性能优于TC4钛合金。

4.3 相变及显微组织

1) 相变温度 α+β↔β相的转变温度为860℃±20℃。

2) 显微组织 合金在室温平衡状态下由α和β相组成，β相的含量一般为25%~30%。当合金从β相区快速冷却时，得到过饱和的马氏体α′相；从α+β相区上部快速冷却时得到初生α和α′相，并伴有少量的保留β相，而在时效过程中α′和保留β相都分解成α和β相；若从α+β相区下部快速冷却，则得到初生α和亚稳定β相，在时效过程中亚稳定β相分解成弥散分布的α和β相。当合金从β相区慢冷下来时形成条状α和β相；而从α+β相区慢冷下来则形成初生α相和转变β。所谓的"转变β"是指以相间存在的片状次生α和保留β两种相。

4.4 力学性能

1) 技术标准规定的性能见表7.3-121。

表 7.3-121 技术标准规定的TC16钛合金性能

技术标准	品种	直径或对边长/mm	状态	室温				
				σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%	a_{KU}/kJ·m⁻²	τ/MPa
XJ/BS 5156—2001	冷镦用棒（线）材	3~10	退火	815~930	≥14	≥65	—	≥620
			固溶时效	1 030~1 180	≥12	≥50	—	≥650
	热轧棒材	8~20	固溶时效	1 030~1 180	≥12	≥50	≥300①	≥650
	六角棒材	7~14	冷作硬化	1 030~1 180	≥10	≥50	—	—

注：冷镦用棒（线）材应进行冷顶锻试验，当锻后高度与锻前高度之比为1:4时，棒（线）材圆周表面应无裂纹。

① 直径不小于14 mm的棒材检验冲击性能。

2) 硬度 退火状态的室温硬度230~280HBS。固溶时效状态的室温硬度340~370HBS。

3) 拉伸性能

① 退火状态的室温拉伸性能见表7.3-122。

表 7.3-122 TC16钛合金退火状态的室温拉伸性能

品种	d/mm	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
冷镦用棒材	4	退火	849	806	25.7	71.9
	6		835	809	22.8	70.4

② 各种温度下的拉伸性能见表7.3-123。

4) 冲击性能见表7.3-124。

5) 扭转性能见表7.3-125。

6) 剪切性能见表7.3-126。

7) 热稳定性见表7.3-127。

8) 持久和蠕变性能

① 高温持久性能见表7.3-128。

② 高温蠕变性能见表7.3-129。

9) 疲劳性能

① 棒材旋转弯曲疲劳极限见表7.3-130。

表 7.3-123 TC16钛合金在各种温度下的拉伸性能

品种	d/mm	状态	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.01}$/MPa	$\sigma_{p0.1}$/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	$\sigma_{0.7}$/MPa	$\sigma_{0.85}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
棒材	18	780℃，2 h，炉冷至550℃，空冷+800℃，2 h，水淬+560℃，10 h，空冷	-70	1 123	—	—	1 113	—	—	15.6	49.3
			-40	1 113	—	—	1 082	—	—	15.6	47.4
			-20	1 053	—	—	1 027	—	—	15.5	55.7
			0	1 030	—	—	998	—	—	17.1	57.6
			20	1 083	946	1 014	1 029	1 054	1 058	18.7	55.2
			100	988	806	895	910	941	947	17.7	66.2
			200	911	708	788	803	848	856	23.7	69.9
			300	838	666	705	717	763	773	17.9	74.2
			400	772	560	644	660	710	719	18.9	76.4

表 7.3-124　TC16 钛合金的冲击性能

品种	d/mm	状态	θ/℃	a_{KU}/kJ·m^{-2}
棒材	16	固溶时效	20	622
	18	固溶时效	-40	568
			20	682
			300	1 057

表 7.3-125　TC16 钛合金的扭转性能

品种	d/mm	状态	θ/℃	τ_b/MPa	$\tau_{p0.3}$/MPa	$\tau_{p0.015}$/MPa
棒材	18	固溶时效	20	871	729	584

表 7.3-126　TC16 钛合金的剪切性能

品种	d/mm	状态	θ/℃	τ/MPa
冷镦用棒材	6	退火	20	639
			200	472
			350	430
棒材	18	固溶时效	20	688

表 7.3-127　TC16 钛合金的热稳定性

品种	d/mm	状态	热暴露条件		σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
			θ/℃	t/h				
棒材	≤20	固溶时效	未暴露		1 088	—	16	59
			300	2 000	1 098	—	15	59
棒材	18	固溶时效	未暴露		1 083	1 029	18.7	55.2
			350	100	1 078	1 021	15.3	58.6

表 7.3-128　TC16 钛合金的高温持久性能

品种	d/mm	状态	θ/℃	σ_{100}/MPa
棒材	4~20	固溶时效	300	686
			350	588

表 7.3-129　TC16 钛合金的高温蠕变性能

品种	d/mm	状态	θ/℃	$\sigma_{0.2/100}$/MPa
棒材	4~20	固溶时效	300	490
			350	392

表 7.3-130　TC16 钛合金棒材的旋转弯曲疲劳极限

品种	d/mm	状态	θ/℃	K_t	R	N/周	σ_D/MPa
棒材	4~20	固溶时效	20	1	-1	10^7	431
				2.33	-1	10^7	314
			400	1	-1	10^7	324
				2.33	-1	10^7	294

② 室温轴向加载疲劳极限见表 7.3-131。疲劳 S-N 曲线见图 7.3-46 和图 7.3-47。

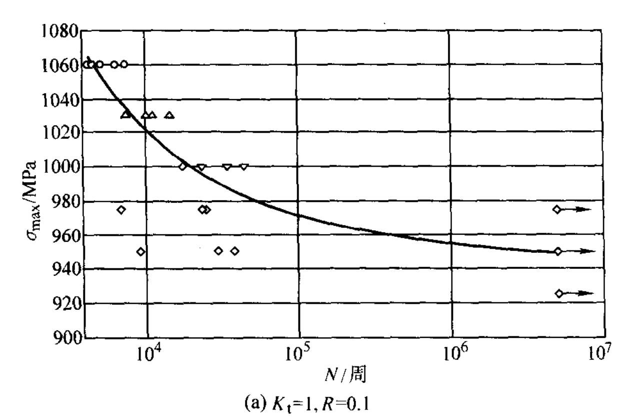
10）弹性性能

① 拉伸弹性模量见表 7.3-132。

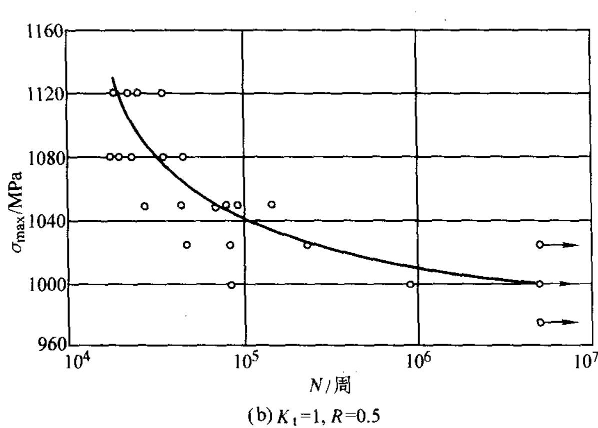
② 切变模量见表 7.3-133。

表 7.3-131　TC16 钛合金棒材的室温轴向加载疲劳极限

品种	d/mm	状态	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	K_t	R	f/Hz	N/周	σ_D /MPa
棒材	18	固溶时效	1 083	1 029	1	0.1	30~40	5×10^6	955
						0.5			1 008
					3	0	30~40	5×10^6	187
						0.5			305



(a) K_t=1, R=0.1



(b) K_t=1, R=0.5

图 7.3-46　TC16 钛合金棒材光滑试样室温轴向加载疲劳 S-N 曲线

③ 泊松比见表 7.3-134。

11）紧固件力学性能见表 7.3-135~表 7.3-137。

4.5　制造工艺和性能

1）热处理制度

① 退火 770~790℃，1~2 h，以 2~4℃/min 的速度炉冷至 550℃（在真空中不高于 500℃），然后空冷。

② 去应力退火 550~650℃，0.5~4 h，空冷。

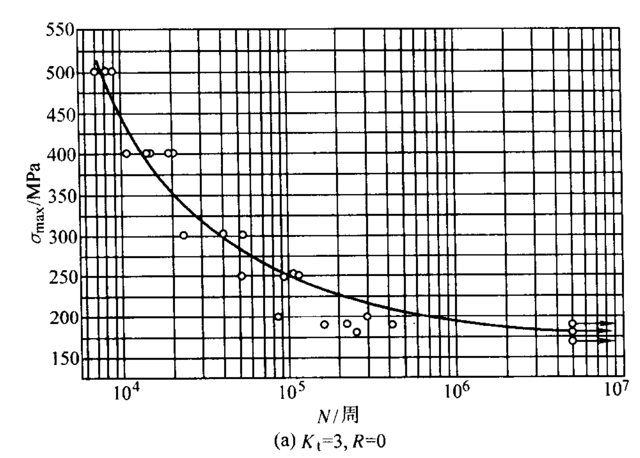
③ 固溶处理 780~830℃，1.5~2.5 h，水淬。

④ 时效 500~580℃，6~10 h，空冷。

2）熔炼与铸造工艺　制造棒材用的铸锭应经过两次以上真空自耗电极电弧炉熔炼。选用氧含量不大于 0.08% 的 0~2级小颗粒海绵钛和钼含量 80%~85% 的 Al-Mo 中间合金以及钒含量 80%~85% 的 Al-V 中间合金，应特别注意布料方式，保证各种合金元素在电极块中的分布均匀性。自耗电极的焊接采用氩气保护等离子焊接方式，严禁使用钨极氩弧焊。

一次真空熔炼时的绝对压强应不大于 1.3Pa。最后一次重熔可以在真空中或氩气气氛中进行。熔炼结束前必须进行热封顶操作。





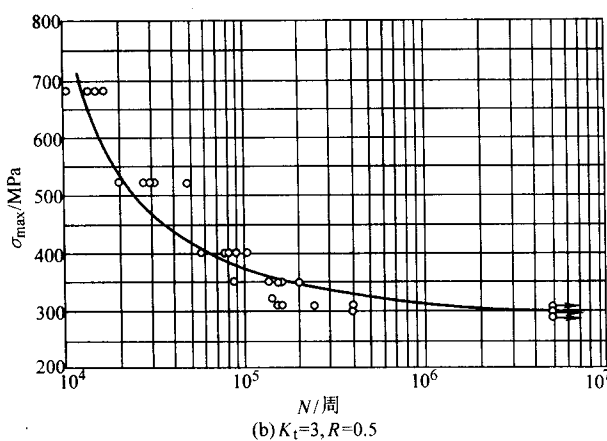


图 7.3-47 TC16 钛合金棒材缺口试样室温轴向加载疲劳 S-N 曲线

表 7.3-132 TC16 钛合金的拉伸弹性模量

品种	d/mm	状态	θ/℃	E/GPa
磨光棒材	4~20	退火	20	103.0
		固溶时效	20	109.8
			300	90.2
棒材	18	固溶时效	20	102.7
			100	99.1
			200	94.0
			300	88.2
			400	84.4

表 7.3-133 TC16 钛合金的切变模量

品种	d/mm	状态	θ/℃	G/GPa
棒材	18	固溶时效	20	41.6

表 7.3-134 TC16 钛合金的泊松比

品种	d/mm	状态	θ/℃	μ
棒材	18	固溶时效	20	0.23

表 7.3-135 TC16 钛合金紧固件的拉伸和剪切性能

紧固件	状态	θ/℃	σ_b/MPa	τ/MPa	下列偏斜角时的 σ_b/MPa	
					4°	8°
M10×1.5 螺栓	退火	20	1 030	628	1 030	1 030
	固溶时效		1 226	706	1 079	981

表 7.3-136 TC16 钛合金紧固件的轴向加载疲劳极限

紧固件	状态	θ/℃	R	N/周	σ_D/MPa
M10×1.5 螺栓	固溶时效	20	0.1	2×10^7	157

表 7.3-137 TC16 钛合金紧固件的轴向加载应力控制低周疲劳性能

紧固件	状态	θ/℃	R	σ_{max}/MPa	N/周
M10×1.5 螺栓	固溶时效	20	0.1	392	20 000
				490	7 000
				588	2 500
				686	1 000
		350	0.1	294	38 000
				392	9 000
				490	2 000
				539	1 000

3）热变形工艺规范见表 7.3-138。不同变形速率下的变形抗力见表 7.3-139。工艺塑性图见图 7.3-48。

表 7.3-138 TC16 钛合金的热变形工艺规范

热变形类型	加热温度/℃	终止温度/℃	一火变形量/%
铸锭开坯	1 100~1 150	≥850	30~60
坯料各方向锻造	950~1 000	≥850	40~70
坯料最终锻造	850~950	≥700	40~70
热轧	800~850	≥700	40~70
旋锻	800~820	≥650	10~20

表 7.3-139 TC16 钛合金不同变形速率下的变形抗力

变形温度/℃	以下变形速率（s^{-1}）的最大变形抗力/MPa			
	10^{-2}	1	10	10^2
700	274	347	378	452
800	86	214	247	306
900	40	85	122	156
1 000	19	54	77	105
1 100	—	47	63	75

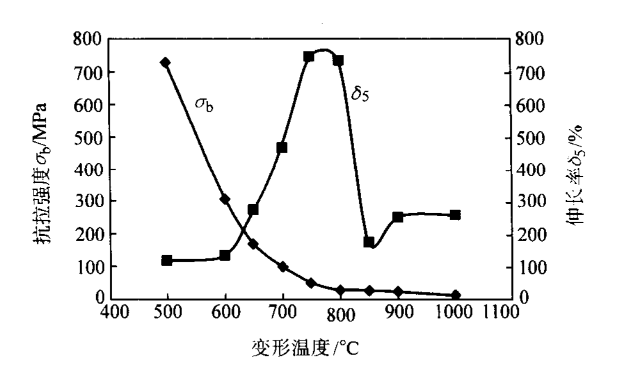


图 7.3-48 TC16 钛合金棒材的工艺塑性

4）焊接性能 适合于钛合金的所有焊接方法进行焊接。

5）紧固件热处理工艺 TC16 合金紧固件的强化热处理一般由三个工序组成：退火（780℃±10℃，2 h，以 2~4

℃/min的速度炉冷至550℃，然后空冷）、固溶处理（800℃±10℃，2 h，水淬）和时效（560℃±10℃，6～10 h，空冷）。

TC16合金紧固件的强化热处理允许按下述制度进行：810～790℃，2 h，以2～4℃/min速度炉冷至760～780℃，2 h，水淬；在500～540℃时效，4～8 h，空冷。

4.6　选材及应用

俄罗斯发展了以该合金为主的航空用钛合金紧固件材料体系，品种规格齐全，包括冷镦、热镦用棒材以及六角棒材。在军用和民用各种飞机上均大量使用该合金的紧固件。在我国新型飞机上也获得了实际应用。

在各种型号的飞机上推荐使用TC16钛合金制造螺栓、铆钉等紧固件。

5　TC17钛合金

TC17钛合金是一种富β相的α-β型钛合金，名义成分为Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr。含有α稳定元素Al，中性稳定元素Sn和Zr，同晶型β稳定元素Mo，共析型β稳定元素Cr。TC17钛合金名义成分的铝当量为7.0（其中O含量按0.1%计算），钼当量为10.4。该合金具有强度高、断裂韧度好、淬透性高和锻造温度范围宽等一系列优点，能够满足损伤容限设计的需要和高结构效益、高可靠性及低制造成本的要求。TC17钛合金的最高工作温度可达427℃。

TC17钛合金的主要半成品是棒材和锻件。广泛应用于航空发动机风扇盘、压气机盘和大截面的锻件。该合金既可以在β区变形，也可以在α+β区变形，并随后进行相应的热处理。通过热处理可以调整强度、塑性和韧性的匹配。与通用的两相钛合金相比有更高的强度、淬透性和抗蠕变能力；与β钛合金相比有低的密度和高的弹性模量、抗蠕变性能。该合金能采用各种焊接方式进行焊接。

1）材料牌号　TC17。

2）相近牌号　Ti-17，Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr（美国）。

5.1　化学成分

Q/S10-0345-2002《TC17钛合金棒材的技术标准》和Q/S10-0535-2003《TC17钛合金盘件的技术标准》规定的化学成分见表7.3-140。

表7.3-140　TC17钛合金化学成分（质量分数）　%

合金元素						杂质≤						
Al	Sn	Zr	Mo	Cr	Ti	Fe	C	N	H	O	其他元素①	
											单个	总和
4.5～5.5	1.5～2.5	1.5～2.5	3.5～4.5	3.5～4.5	余量	0.30	0.05	0.04	0.0125	0.08～0.13	0.10	0.30

① 产品出厂时供方可不检验其他元素，用户要求并在合同中注明时可予以检验。

5.2　物理及化学性能

1）密度　ρ=4.65 g/cm³。

2）热导率　室温热导率为8.2 W·m⁻¹·K⁻¹。

3）线胀系数　见表7.3-141。

4）磁性能　无磁性。

5）抗氧化性能　与TC4合金相近。

表7.3-141　TC17钛合金的线胀系数

θ/℃	20～100	20～150	20～200	20～250	20～300	20～350	20～400	20～450
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	9.0	9.0	9.0	9.2	9.4	9.5	9.7	9.9

6）耐腐蚀性能　TC17钛合金具有良好的抗腐蚀能力，与TA19合金相仿，对热盐应力腐蚀也存在着一定的敏感性。因此，当零件用于热盐应力腐蚀的环境时，还应考虑这一限制因素。对零件表面进行阳极氧化处理能有效地提高该合金的抗热盐应力腐蚀能力。

5.3　相变及显微组织

1）相变温度　α+β↔β相的转变温度为890℃±15℃。

2）显微组织　TC17钛合金经β相区固溶处理后快速冷却时，显微组织为亚稳定β相组织；而中速冷却时，α相在原始β晶界上优先形成，但α也在整个晶粒内部均匀弥散析出；慢速冷却时，表现为魏氏体组织特征，并有连续的、粗大的α晶界。时效时，亚稳定β相分解为α相和稳定的β相。TC17钛合金在500℃以上温度时效时，α相首先在晶界上形核，并向β基体内生长；在低于500℃时效时，α相在整个基体内形核，并呈鱼刺状生长。β区加工的TC17钛合金的典型显微组织见图7.3-49。

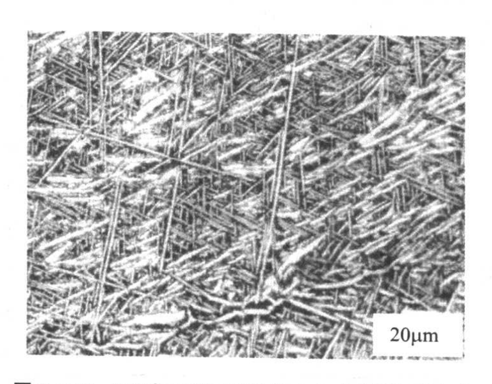


图7.3-49　β区加工的TC17钛合金的典型显微组织

5.4　力学性能

1）技术标准规定的性能见表7.3-142和表7.3-143。

表7.3-142　TC17钛合金棒材的技术标准

技术标准	品种	状态	d或δ/mm	取样方向	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
						≥			
Q/S10-0345-2002	棒材	840℃/1 h，AC+800℃/4 h，WQ+630℃/8 h，AC	90	L	室温	1 120	1 030	7	15
					370	905	—	12	30

θ/℃	σ_{100}/MPa	θ/℃	$\sigma_{0.2/100}$/MPa	热稳定性①≥			
	≥		不小于	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
370	685	400	355	1 120	1 030	6	13

① 最终机械加工成拉伸试样，经过370℃，100 h热暴露后的室温拉伸性能。

表 7.3-143 TC17 钛合金盘件的技术标准

技术标准	品种	状态	d 或 δ /mm	取样方向	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
					≥				
Q/S10-0535-2003	盘模锻件	800℃/4 h，WQ +630℃/8 h，AC	510×92	C	室温	1 120	1 030	5	10

断裂韧度	室温低循环疲劳				
K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$ ≥	K_t	交变应变幅/平均应变	总应变范围 mm·mm^{-1}	循环频率 /次·min^{-1}	循环寿命周次 N_f≥
54.9	1.0	1.00±0.02	0.009 3	10~30	11 000

2）室温及各种温度下的力学性能

① 硬度　室温硬度 39~40HRC；HB 见表 7.3-144。

表 7.3-144 TC17 钛合金的硬度

品种	d 或 δ/mm	状态	HB
棒材	90	840℃/1 h，AC+800℃/4 h，WQ +630℃/8 h，AC	373
β锻盘模锻件	510×92	800℃/4 h，WQ+630℃/8 h，AC	357

② 拉伸性能　棒材的不同温度拉伸性能见表 7.3-145。

表 7.3-145 TC17 钛合金棒材的拉伸性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
棒材		840℃/1 h，AC+800℃/4 h，WQ+630℃/8 h，AC	L	20	1 159	1 093	9.4	26.0
				100	1 134	1 081	15.3	63.2
				200	1 066	972	15.4	64.8
				300	1 027	911	15.0	62.7
				400	983	863	15.4	65.2
				500	905	825	21.1	81.9

环坯和盘模锻件在各种温度下的拉伸性能见表 7.3-146。

表 7.3-146 TC17 钛合金环坯和盘模锻件的拉伸性能

品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
环坯	425×110	840℃/1 h，AC +800℃/4 h，WQ +630℃/8 h，AC	C	20	1 182	1 150	12.0	38.5
				370	918	—	16.0	52.0
β锻盘模锻件	510×92	800℃/4 h，WQ +630℃/8 h，AC	C	20	1 219	1 166	10.0	18.4
				100	1 145	1 058	7.7	17.1
				200	1 083	970	7.4	19.5
				300	1 034	890	8.4	23.5
				400	996	856	10.5	23.7
				450	956	822	13.6	36.7
				500	868	757	21.6	60.7

③ 冲击性能　室温冲击韧度见表 7.3-147。

④ 应力集中见表 7.3-148。

⑤ 热稳定性　棒材的试样热暴露后的室温拉伸性能见表 7.3-149。

表 7.3-147 TC17 钛合金的冲击韧度

品种	d 或 δ /mm	状态	部位	取样方向	a_{KU} /kJ·m^{-2}
棒材	90	840℃/1 h，AC+800℃/4 h，WQ+630℃/8 h，AC	R/2	L	330
环坯	425×110	840℃/1 h，AC+800℃/4 h，WQ+630℃/8 h，AC	边缘	C	215
盘模锻件	510×92	800℃/4 h，WQ+630℃/8 h，AC	轮缘	C	235

表 7.3-148 TC17 钛合金的应力集中性能

品种	d 或 δ /mm	状态	取样方向	K_t	θ/℃	σ_b/MPa	σ_{bH}/MPa	σ_{bH}/σ_b
棒材	20	840℃/1 h，AC +800℃/4 h，WQ +630℃/8 h，AC	L	3	20	1 159	1 807	1.56
					100	1 134	1 760	1.55
					200	1 066	1 641	1.54
					300	1 027	1 562	1.52
					400	983	1 484	1.51
					500	905	1 418	1.57
盘模锻件	510×92	800℃/4 h，WQ +630℃/8 h，AC	C	3	20	1 210	1 699	1.40
	—	787℃/4 h，FAC +620℃/8 h，AC	C	3.5	20	1 179	1 683	1.43
			R	3.5		1 186	1 620	1.37
			轴向	3.5		1 165	1 400	1.20

表 7.3-149 TC17 钛合金棒材的热稳定性

品种	d /mm	状态	取样方向	热暴露条件 θ/℃	热暴露条件 t/h	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
棒材	20	840℃/1 h，AC +800℃/4 h，WQ +630℃/8 h，AC	L	未暴露		1 187	1 153	15.3	31.3
				400	100	1 230	1 170	15.3	28.0
	60			未暴露		1 140	1 095	14.0	42.0
				370	100	1 130	—	16.0	49.0
				400	100	1 205	—	13.4	34.7
	90			未暴露		1 167	1 145	15.9	50.0
				370	100	1 221	—	13.2	53.2
				400	100	1 213	—	14.0	47.9

环坯和盘模锻件的试样热暴露后的室温拉伸性能见表7.3-150。

表 7.3-150 TC17 钛合金环坯和盘模锻件的热稳定性

品种	D 或 δ /mm	状态	取样方向	热暴露条件 θ/℃	t/h	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
环坯	425×110	840℃/1 h，AC +800℃/4 h，WQ +630℃/8 h，AC	C	未暴露		1 166	1 143	12.2	43.1
				370	100	1 185	1 157	12.8	38.5
				450	100	1 210	1 177	9.4	26.1
盘模锻件	510×92	800℃/4 h，WQ +630℃/8 h，AC	C	未暴露		1 204	1 151	10.8	20.1
				400	100	1 220	1 112	10.6	21.9
				450	100	1 236	1 179	9.3	16.1

3）持久和蠕变性能见表7.3-151。

表 7.3-151 TC17 钛合金的持久和蠕变性能

品种	状态	温度 /℃	持久性能 应力	持久性能 时间/h	蠕变性能 应力	蠕变性能 塑性应变至0.2%的时间/h
自由锻件	840℃/1 h，AC +800℃/4 h，WQ +630℃/8 h，AC	204	965	800	793	2 200
			983	600	814	400
			1 000	0.01	827	0.01
		316	896	>1 000	690	1 000
			917	0.01	724	500
			931	0.01	745	125
		427	690	>500	241	150
			758	25	345	75
			793	10	414	30

4）疲劳性能

① 高周疲劳 旋转弯曲疲劳极限见表7.3-152。

表 7.3-152 TC17 钛合金的旋转弯曲疲劳性能

品种	D 或 δ /mm	状态	取样方向	θ /℃	K_t	R	f /Hz	N /周	σ_D /MPa
棒材	20	840℃/1 h，AC +800℃/4 h，WQ +630℃/8 h，AC	L	20	1	-1	83	10^7	560
				400	1	-1	83	10^7	472
盘模锻件	510×92	800℃/4 h，WQ +630℃/8 h，AC	C	20	1	-1	83	10^7	535
					1.7	-1	83	10^7	371
					3	-1	83	10^7	223
				400	1	-1	83	10^7	458
					3	-1	83	10^7	219

② 低周疲劳 盘模锻件室温应变控制低周疲劳数据见表7.3-153和表7.3-154。

表 7.3-153 TC17 钛合金的应变控制低周疲劳性能

品种	D 或 δ /mm	状态	取样部位	θ /℃	f /Hz	应变 ε_{max}/%	应变 ε_{min}/%	循环次数 N	试样数量
盘模锻件	510×92	800℃/4 h，WQ +630℃/8 h，AC	轮缘	20	0.33	0.93	0	11 793	3
			辐板	20	0.33	0.93	0	10 926	3

表 7.3-154 TC17 钛合金的应变控制低周疲劳性能

材料品种	盘模锻件	试样尺寸	ϕ6.35 mm		
材料规格	ϕ510 mm×92 mm	加载波形	三角波		
取样方向	C	应变比	-1		
试验温度	20℃	试验频率	0.1～1.0 Hz		
控制方法	轴向应变	失效判据	断裂		
热处理状态	800℃，4 h，WQ+630℃，8 h，AC				
$\Delta\varepsilon_t/2$ %	$\Delta\varepsilon_e/2$ %	$\Delta\varepsilon_p/2$ %	$\Delta\varepsilon_p/2$ MPa	反向数 $2N_f$	试样数量
1.982	1.011	0.881	1 188	52	1
1.489	0.939	0.550	1 103	520	1
1.005	0.882	0.123	1 037	1 714	1
0.795	0.762	0.033	896	4 382	1
0.700	0.681	0.019	800	14 656	1
0.602	0.577	0.025	678	33 186	1
0.500	0.492	0.008	579	104 300	1

应变疲劳参数	σ'_f/MPa	b	ε'_f/%	C	K'/MPa	n'
	1 943	0.097	10.0	-0.55	2 322	0.13
曲线的数学表达式	$\Delta\varepsilon_t/2=0.0165\ (2N_f)^{-0.097}+0.10\ (2N_f)^{-0.55}$					
	$\Delta\sigma/2=2\ 322\ (\Delta\varepsilon_p/2)^{0.13}$					

5）弹性性能见表7.3-155。

表 7.3-155 TC17 钛合金的弹性模量

品种	盘模锻件					
D 或 δ/mm	510×92					
状态	800℃，4 h，WQ+630℃，8 h，AC					
θ/℃	20	100	200	300	400	500
E/GPa	112	105	99	97	92	83

6）断裂性能 室温断裂韧度见表7.3-156。

表 7.3-156 TC17 钛合金的断裂韧度

品种	d 或 δ /mm	状态	取样部位	试样类型	取样方向	K_{IC} /MPa·m$^{1/2}$
盘模锻件	510×92	800℃，4 h，WQ +630℃，8 h，AC	辐板	C-T	R-C	65.9
				C-T	C-R	59.7
			轮缘	C-T	R-C	57.2

5.5 制造工艺和性能

1）热处理工艺和性能

① 固溶处理 800℃±10℃，4 h，水淬，适用于β锻造的材料；840℃±10℃，1 h，空冷+800℃±10℃，4 h，水淬，适用于α+β锻造的材料。

② 时效 在585～685℃范围内选定时效温度，典型的时效制度是630℃，8 h，空冷。

③ 去应力退火 一般在不高于时效温度的480～650℃温度下加热，保温1～4 h，空冷或炉冷。典型的去应力退火制度是550℃，4 h，空冷。去应力退火可以在空气炉或真空炉中进行。

2）成形工艺和性能

① 热变形温度下的变形抗力见表 7.3-157。

表 7.3-157 TC17 钛合金的变形抗力

品种	状态	d/mm	拉伸速度 mm·s^{-1}	θ/℃	σ_b /MPa	ψ/%
棒材	锻态	250	3	800	263	89.8
				900	129	90.8
				950	103	91.3
				1 000	74	93
				1 100	48	81.6
			1 200	800	483	77.0
				900	293	78.3
				950	251	79.8
				1 000	276	85.3
				1 100	287	56.7

② 热变形工艺 TC17 钛合金无论在闭式或开式模锻时都表现出很好的加工性能，可以采用两相区（815～860℃）或β区（900～950℃）进行锻造。与锤锻相比，压力机锻造是最理想的，特别是对于两相区。α+β区锻造材料通常具有稍高的屈服强度和塑性。β锻造产生较高的断裂韧度和蠕变抗力，但对疲劳没有影响。β锻造必须一火完成，不允许进行重新加热锻造。热变形工艺规范见表 7.3-158。

表 7.3-158 TC17 钛合金的热变形工艺

热变形类型	加热温度/℃	终锻温度/℃	一火变形量/%
铸锭开坯	1 050～1 100	>800	50～70
α+β区模锻	800～845	>700	30～50
β区模锻	915～950	>700	β区 30～50，α+β区 20～40

3）焊接工艺和性能

可以采用适合于钛合金的各种焊接方法进行焊接。

5.6 选材及应用

TC17 钛合金是美国 GE 公司于二十世纪七十年代研制成功的，淬透厚度达 150 mm。主要用于制造要求高强度的、大截面的航空发动机风扇盘、压气机盘、轴、离心叶轮和直升机桨毂、盘片整体件等转动零部件。图 7.3-50 为 GE90 发动机压气机的整体转子件，是采用惯性摩擦焊焊接成整体转子，其中 2～4 采用 TC17 钛合金制造（5－6 级为 TA19 钛合金）。图 7.3-51 为用 TC17 钛合金制造的直升机桨毂锻件，最大外径为 1 400 mm，最大截面厚度为 380 mm，质量为 330 kg。

为了减小在凝固过程中β稳定元素（Cr 元素）的偏析，要求特殊的铸锭熔炼条件。β稳定元素的过度偏析，在锻造和热处理时可能产生β斑，β斑降低疲劳、断裂韧性和塑性等力学性能。锻造和热处理都必须严格地控制，以减小β斑的影响。

GE 公司已经要求，用于生产航空发动机转动零件的 TC17 钛合金必须采用真空自耗电弧炉三次熔炼或冷床炉+真空自耗电弧炉熔炼工艺。我国 TC17 钛合金目前均采用真空自耗电弧炉三次熔炼工艺生产。



图 7.3-50 GE90 发动机压气机的转子件
（2～4 级为 TC17 钛合金制造的）

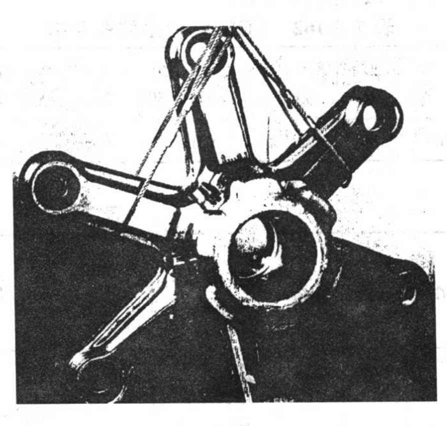


图 7.3-51 用 TC17 钛合金制造的直升机桨毂锻件

6 TC18 钛合金

TC18 是高合金化的α+β型钛合金，名义成分为 Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe，名义成分下的铝当量为 5.0，钼当量为 11.76。该合金退火状态下的组织中具有数量大致相等的α相和β相，是退火状态下强度最高的钛合金。该合金可以用各种焊接方式进行焊接，退火后具有良好的焊接性能。TC18 合金的最高工作温度为 400℃。

由于淬透厚度可达 250 mm，TC18 合金特别适合制造飞机机身和起落架上的大型承力结构件，在飞机结构中用 TC18 钛合金代替高强钢或 Ti-6Al-4V 合金，可减重 15%～20%。该合金一般在退火状态下使用，也可以通过固溶时效进行强化，其主要半成品包括板材、棒材、管材、紧固件、挤压型材和锻件等。

1）材料牌号 TC18。

2）相近牌号 BT22（俄罗斯）。

6.1 化学成分

“协上五高”51－2002《航空用 TC18 钛合金锻件技术条件》中规定的 TC18 钛合金化学成分见表 7.3-159。

表 7.3-159 TC18 钛合金化学成分（质量分数）

%

主要元素						杂质元素≤						
Ti	Al	Mo	V	Cr	Fe	C	Si	Zr	O	N	H	其他杂质总量
基	4.4～5.7	4.0～5.5	4.0～5.5	0.5～1.5	0.5～1.5	0.10	0.15	0.30	0.18	0.05	0.015	0.30

6.2　物理及化学性能

1）密度 $\rho=4.62\ g/cm^3$。

2）热导率见表7.3-160。

表7.3-160　TC18钛合金热导率

θ/℃	100	200	300	400	500	600	700	800	900
$\lambda/W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	9.21	10.5	11.7	13.4	14.6	15.9	17.2	18.4	19.7

3）比热容见表7.3-161。

表7.3-161　TC18钛合金比热容

θ/℃	100	200	300	400	500	600	700	800
$c/J\cdot Kg^{-1}\cdot K^{-1}$	523	565	586	649	712	795	879	863

4）线胀系数见表7.3-162。

表7.3-162　TC18钛合金线胀系数

θ/℃	20～100	20～200	20～300	20～400	20～500	100～200	200～300	300～400	400～500
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	8.0	8.2	8.4	8.6	8.8	8.4	8.8	9.3	9.8

5）电阻率见表7.3-163。

表7.3-163　TC18钛合金电阻率

θ/℃	-100	-60	0	20	100	200	300	350	400
$\rho/\mu\Omega\cdot m$	1.47	1.48	1.51	1.53	1.56	1.59	1.62	1.63	1.64

6）磁性能　无磁性。

7）耐腐蚀性能　在大气条件下及300℃以下海水中稳定。

6.3　相变及显微组织

1）相变温度　α+β↔β相的转变温度为870℃±20℃。

2）显微组织　合金在平衡状态下由数量大致相等的α相和β相组成。当合金加热至α+β相区的下部并快速冷却时，得到细等轴α相和β相。从α+β区上部（例如850℃）快速冷却时，得到大量β相和少量等轴α相。从β相区快速冷却时，得到单一β相组织，不发生马氏体转变。

6.4　力学性能

1）技术标准规定的性能见表7.3-164。

2）室温及各种温度下的力学性能

① 硬度　退火状态的室温硬度210～250HBS。

表7.3-164　技术标准规定的TC18钛合金性能

技术标准	品种	状态	δ或d /mm	取样方向	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	φ/%	$a_{KU}/J\cdot cm^{-2}$	K_{IC} (T-L) /$MPa\cdot m^{1/2}$	HB (d/mm)
						≥					
协上五高116—2002	棒材	退火	10～35	L	1 080～1 280	1 010	10	30	30	—	—
			35～60				9	25	30	—	—
			60～100				8	16	25	—	—
			100～150				7	16	25	—	—
			75～110	LT	1 080～1 280	1 010	7	14	25	—	—
			110～150				6	14	25	—	—
			150～200				6	14	25	—	—
协上五高51—2002	锻件	退火	—	L	1 080～1 280	1 010	8	20	25	60	3.1～3.6
				T			7	16	—		
				S			7	16	—		

② 拉伸性能　各种温度下的拉伸性能见表7.3-165。

表7.3-165　TC18钛合金各种温度下的拉伸性能

品种	δ或d /mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ/%
棒材	22	退火	L	20	1 149	1 099	16.7	61.1
	155		T		1 114	1 085	11.5	15
锻件	60	退火	L	-70	1 350	1 310	10.7	26.0
				20	1 157	1 119	14.0	44.7
				100	1 082	1 009	12.4	40.1
				200	1 021	897	13.3	43.6
				300	978	826	11.8	41.9
				350	955	794	12.9	45.2
				400	909	760	15.9	59.3

③ 压缩性能　室温压缩性能见表7.3-166。

④ 冲击性能　室温冲击韧度见表7.3-167。

⑤ 扭转性能　室温扭转性能见表7.3-168。

表7.3-166　TC18钛合金室温压缩性能

品种	δ或d/mm	状态	取样方向	$\sigma_{pc0.2}$/MPa
锻件	60	退火	L	1 180

表7.3-167　TC18钛合金室温冲击韧度

品种	δ或d/mm	状态	取样方向	$a_{KU}/J\cdot cm^{-2}$
锻件	60	退火	L	35.9

表7.3-168　TC18钛合金室温扭转性能

品种	δ或d/mm	状态	取样方向	τ_b/MPa	τ_p/MPa	$\tau_{p0.3}$/MPa
锻件	60	退火	L	982	603	753

⑥ 剪切性能　室温剪切性能见表7.3-169。

表7.3-169　TC18钛合金室温剪切性能

品种	δ或d/mm	状态	取样方向	τ/MPa
锻件	60	退火	L	763

⑦ 承载性能 室温承载性能见表7.3-170。

表7.3-170 TC18钛合金室温承载性能

品种	δ或d/mm	状态	e/D	σ_{bru}/MPa	σ_{bry}/MPa
锻件	60	退火	1.5	1 779	1 623
			2.0	2 206	1 854

⑧ 热稳定性 试样热暴露后的室温力学性能见表7.3-171。

表7.3-171 TC18钛合金试样热暴露后的室温力学性能

品种	δ或d/mm	状态	取样方向	热暴露条件		σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
				θ/℃	t/h				
锻件	60	退火	L	未暴露		1 157	1 119	14.0	44.7
				400	100	1 177	1 110	10.7	31.3
					300	1 190	1 123	12.0	36.1
					500	1 213	1 145	13.0	37.0

3）持久性能 高温持久性能见表7.3-172。

表7.3-172 TC18钛合金高温持久性能

品种	δ或d/mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_{100}/MPa
锻件	60	退火	L	400	800

4）疲劳性能 轴向加载疲劳极限见表7.3-173。

表7.3-173 TC18钛合金轴向加载疲劳极限

品种	δ或d/mm	状态	取样方向	θ/℃	K_t	R	f/Hz	N/周	σ_D/MPa
锻件	60	退火	L	20	1	0.06	135	10^7	767
					3	0.06	135	10^7	320

5）弹性性能

① 静态弹性模量见表7.3-174。

表7.3-174 TC18钛合金静态弹性模量

品种	锻件					
δ或d/mm	60					
状态	退火					
取样方向	L					
θ/℃	20	100	200	300	350	400
E/GPa	111	103.0	97.5	94.9	87.1	83.1

② 切变模量见表7.3-175。

表7.3-175 TC18钛合金切变模量

品种	δ或d/mm	状态	取样方向	θ/℃	G/GPa
锻件	60	退火	L	20	43

6.5 制造工艺和性能

1）热处理制度

① 普通退火 720～780℃，1～2 h，随炉冷至400℃，出炉空冷。

② 双重退火 820～850℃，1～3 h，随炉冷至740～760℃，1～3 h，空冷，然后加热到500～650℃，2～6 h，空冷。

③ 固溶时效 700～760℃，1 h，水冷，然后加热到500～560℃，8～16 h，空冷。

④ 去应力退火 600～680℃，0.5～2 h，空冷。去应力退火可以在空气炉或真空炉中进行。

2）热变形工艺性能

① 不同温度下的变形抗力见表7.3-176。

表7.3-176 TC18钛合金不同温度下的变形抗力

变形温度/℃	以下变形速率（s^{-1}）的最大变形抗力/MPa			
	10^{-1}	1	10	10^2
700	—	598	612	694
800	—	313	341	470
900	100	155	210	275
1 000	48	95	144	193

② 热变形工艺和性能 热变形工艺规范见表7.3-177。

表7.3-177 TC18钛合金热变形工艺规范

锻造类型	加热温度/℃	终锻温度/℃
铸锭开坯	1 200～1 050	≥850
坯料锻造 >100 mm	1 050～800	≥800
≤100 mm	980～800	≥800
压力机模锻	870～840	≥800
锻锤模锻	950～840	≥800

3）焊接工艺性能

① 自动氩弧焊焊接接头的力学性能见表7.3-178。

② 点焊接头的力学性能见表7.3-179。

表7.3-178 TC18钛合金自动氩弧焊对接接头的力学性能

焊接材料	焊接方法	δ/mm	焊丝牌号	焊后热处理	σ_b/MPa	a_K/J·cm^{-2}	σ_{max}（MPa）时的N/周		
							635	559	490
TC18+TC18	熔化电极自动氩弧焊	10～30	TA20	750℃，1 h，炉冷至350℃，空冷	931～1 030	34.3	27 500	51 900	71 700
	非熔化电极自动氩弧焊	10～30	TA20		883～981	44～58.8	—	—	—

表7.3-179 TC18钛合金点焊接头的单点剪切和正拉强度

焊接材料	δ/mm	焊后热处理	焊点强度/N		焊点的疲劳寿命循环数
			抗剪强度	撕裂强度	
板材	1.5+1.5 1.5+1.5	退火 固溶时效	16 500 16 600	4 500 4 300	8 000（P_{max}=6 000 N） 5 500（P_{max}=6 000 N）

6.6 选材及应用

TC18（BT22）钛合金是前苏联于20世纪60年代研制成功并得到不断的改进。由于该合金具有高强度、高塑性、淬透性好和可焊接等优点，在俄罗斯已广泛用于制造伊尔－76伊尔、伊尔－86、伊尔－96，安124和图204等飞机机体和起落架的大型承力构件和部件，见图7.3-52和图7.3-53。该合金也可用于制造工作温度不超过350℃的发动机风扇盘和叶片等。在我国某型号战斗机上TC18合金被用于制造起落架上的轮叉（图7.3-54）和扭力臂等重要承力构件。

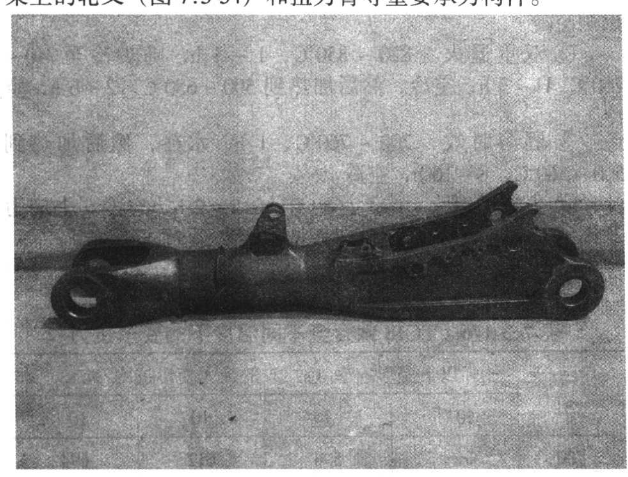


图7.3-52 伊尔－76飞机起落架上的BT22零件

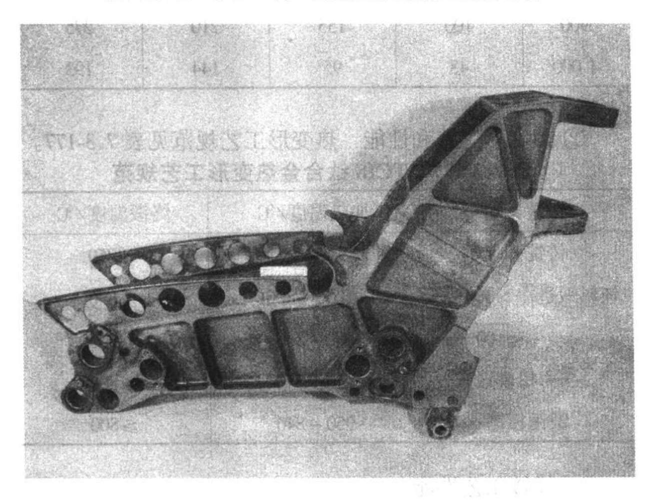


图7.3-53 伊尔－76飞机机身上的BT22零件

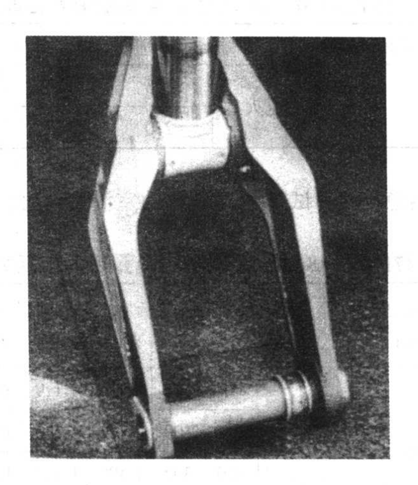


图7.3-54 我国某型号飞机起落架上的TC18零件

7 TC19钛合金

TC19（Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo）是一种高铝含量的马氏体α+β两相热强钛合金，它是在Ti-6242合金成分基础上发展成的。该合金保持了Ti-6242合金的高温蠕变强度并明显地改善了室温和高温拉伸强度。由于合金含有6%的β元素Mo，β相稳定性较好，可通过热处理强化。该合金的淬透深度可达76 mm，所以它主要用于航空发动机中温段的零部件，特别是压气机盘、风扇盘和叶片等重要构件。该合金具有较好的综合性能，可进行压力加工成形和机加工等，其主要半成品有棒材、锻件和板材等。

1）材料牌号 TC19。

2）相近牌号 Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo（美国）。

7.1 化学成分

TC19合金的成分见表7.3-180。

7.2 物理及化学性能

1）密度 $\rho = 4.65\ g/cm^3$。

2）熔化温度 1 595～1 675℃。

3）热导率 热导率见表7.3-181所示。

4）比热容 室温比热容 $c = 500\ J/(kg \cdot K)$

5）线胀系数见表7.3-182所示。

表7.3-180 TC19合金的化学成分（质量分数） %

标准	牌号	合金元素					杂质元素						其他	
		Ti	Al	Sn	Zr	Mo	Fe	Si	C	N	H	O	单个	总合
Q/BS	TC19	余	5.5～6.5	1.75～2.25	3.6～4.4	5.5～6.5	0.15	0.15	0.10	0.05	0.015	0.15	0.10	0.40
AMS	Ti-6246	余	5.5～6.5	1.75～2.25	3.5～4.5	5.5～6.5	0.15	—	0.04	0.04	0.012 5	0.15	0.10	0.40

表7.3-181 TC19钛合金热导率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
$\lambda/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	7.7	8.0	9.3	10.4	11.8	12.8	14.3

表7.3-182 TC19钛合金的线胀系数

θ/℃	20～100	20～200	20～300	20～400	20～500	20～600
$\alpha_1/10^{-6}K^{-1}$	9.4	9.8	10.2	10.3	10.4	10.4

6）电性能 见表7.3-183所示。

表7.3-183 TC19钛合金电阻率

θ/℃	20	100	200	300	400	500
$\rho/\mu\Omega \cdot m$	1.9～2.05					

7）磁性能 无磁性。

8）耐腐蚀性能

① 均匀腐蚀 TC19合金的耐蚀性见图7.3-55和表7.3-184所示。从图7.3-55和表7.3-184可见，该合金在某些特定介质中具有良好的耐蚀性，但是它在氧化性介质中的耐蚀性和抗点蚀能力不如工业纯钛，然而，TC19合金发生点蚀十分轻微。由于该合金含有6%的β稳定元素Mo，从而改善了该合金在还原性介质中的耐蚀性，但却降低了在氧化性介质中的耐蚀性。

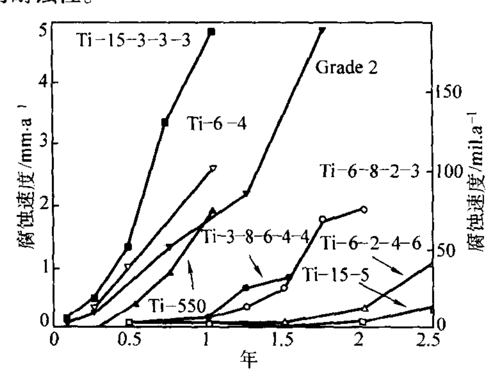


图7.3-55 TC19合金在自然通气的盐酸溶液中的腐蚀性

表7.3-184 TC19在特定介质中腐蚀速度

介质	浓度/%	温度/℃	腐蚀速度/mm·a⁻¹
$FeCl_3$	10	沸腾	0.06
HCOOH	50	沸腾	0.62
HCl	0.5	沸腾	nil
	1.0	沸腾	0.03
HCl，通气	Ph1	沸腾	0.01
HCl + 0.1% $FeCl_3$	5	沸腾	0.068

② 缝隙腐蚀 TC19合金由于钼在还原环境下耐蚀性，有很好的抗缝隙腐蚀性能。试验表明，该合金在任何pH值下的饱和盐酸水中不产生缝隙腐蚀，见图7.3-56所示。

③ 应力腐蚀裂纹 据资料报道β锻造态比α+β态在盐水中的抗应力腐蚀裂纹性能要好。双重退火也改善了在盐水中的裂纹阻力，见表7.3-185所示。

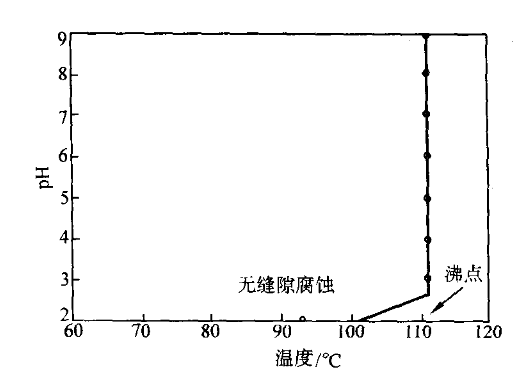


图7.3-56 TC19合金饱和盐水中的缝隙腐蚀性

表7.3-185 TC19在空气和3.5%NaCl溶液中的断裂韧度（25℃）

合金	厚度/mm	热处理	屈服强度/MPa	断裂韧度	
				K_{IC}或K_C /MPa·m$^{1/2}$	K_{ISCC}或K_{SCC} /MPa·m$^{1/2}$
Ti-6246	13	完全退火	1 103	60	22
		双重退火	1 034	88	49
	7	完全退火	965	57	28

7.3 相变及显微组织

1）相变温度 α+β↔β相的转变温度为935℃。

2）显微组织 TC19合金的典型显微组织为在转变β基体上分布等轴初生α组织。但是显微组织与加工工艺和热处理制度有密切的关系，如通过β加工或热处理可得到针状的β转变组织。固溶处理的合金在时效过程中，部分是由于α'（马氏体）的时效而强化，进一步的强化是由于保留β相分解产生的精细的α相造成的。

7.4 力学性能

1）技术标准规定的性能见表7.3-186。

表7.3-186 技术标准规定的TC19合金的拉伸性能

技术标准	品种	状态	尺寸/mm	取样方向	室温性能				470℃性能			
					σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ/%	ψ/%	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ/%	ψ/%
Q/BS	棒	①	12~60	L	1 170	1 100	10	20	930	725	10	30
		①	61~75	L	1 140	1 070	8	15	930	725	10	30
		①	76~100	LT	1 100	1 030	6	12	—	—	—	—
				L	1 100	1 030	8	15	—	—	—	—

① 热处理：815~910℃/1 h，快速空冷+595℃/4~8 h，空冷。

2）室温及各种温度下的力学性能

① 硬度 STA状态的TC19合金的室温典型硬度为36~42 HRC，而锻造状态的硬度为33~38 HRC。

② 拉伸性能 棒材的拉伸性能 见表7.3-187所示。

表7.3-187 TC17合金棒材的拉伸性能

规格/mm	方向	状态	试验温度/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ/%	ψ/%
150	L	热处理	室温	1 450	1 310	9	18
	LT	热处理	室温	1 395	1 245	5	8.5
	L	热处理	470	1 115	865	7.5	23
	LT	热处理	470	1 090	830	8.0	20

续表7.3-187

规格/mm	方向	状态	试验温度/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ/%	ψ/%
110	L	热处理	室温	1 480	1 335	10	26
	LT	热处理	室温	1 475	1 300	7	16
	L	热处理	470	1 100	890	12	38
	LT	热处理	470	1 110	880	11	24

TC19在不同组织、热处理条件下的拉伸性能见表7.3-188。

TC19合金在不同温度下的拉伸性能见图7.3-57所示，

在不同温度下的压缩强度见图 7.3-58 所示。

表 7.3-188　TC17 合金热处理条件下的室温拉伸性能

状态	$\sigma_{p0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%	ψ/%
10-20%初生 α + STA①	1 118	1 214	13	37
10-20%初生 α + STOA②	1 021	1 090	16	42
40-50%初生 α + STA①	1 152	1 242	14	42
40-50%初生 α + STOA②	1 070	1 145	14	41
β锻造 + STA③	1 049	1 201	6.5	13

① STA—885℃/1 h，空冷 + 595℃/8 h，空冷；
② STOA—885℃/1 h，空冷 + 705℃/1 h，空冷；
③ STA—985℃，(β_t - 15℃)，空冷 + 595℃/8 h，空冷。

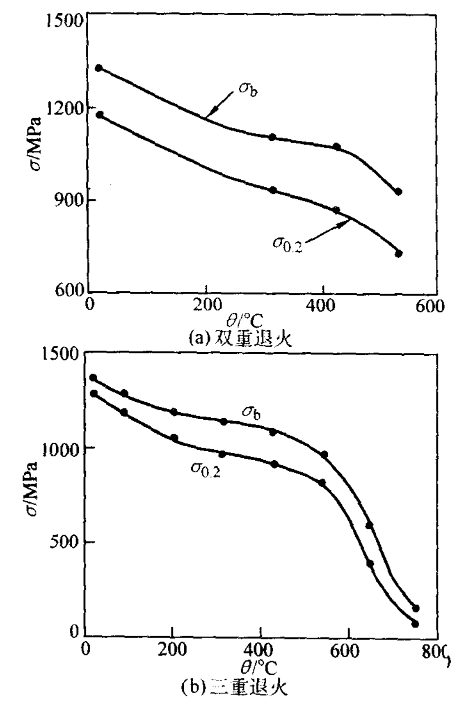


图 7.3-57　TC19 钛合金的高温拉伸性能

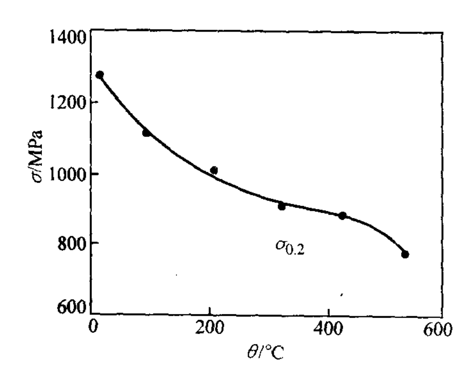


图 7.3-58　TC19 钛合金的高温压缩强度

③ 蠕变性能　锻造工艺对 TC19 钛合金蠕变性能的影响见表 7.3-189。

④ 疲劳性能　高周疲劳见表 7.3-190、表 7.3-191。

低周疲劳见图 7.3-59 所示。

疲劳裂纹扩展见表 7.3-192 所示。

表 7.3-189　锻造工艺对 TC19 合金蠕变性能的影响

暴露条件			0.1%蠕变时间/h	0.2%蠕变时间/h	完全塑性变形/%
温度/℃	应力/MPa	时间/h			
α - β锻造：					
750	620	1 228	270	840	0.251
800	613	150	—	—	0.101
	517	504	105	420	0.217
	586	241	40	210	0.234
	586	150	—	—	0.180
1 000	138	51	6	27	0.246
	207	72	2	8	0.760
	207	150	—	—	0.820
1 010℃β锻造：					
750	620	336	75	264	0.203
	613	150	—	—	0.091
800	517	290	35	250	0.223
	586	313	25	165	0.252
1 000	138	120	4	22	0.427
	207	72	1	6	0.613

表 7.3-190　TC19 合金经 10^7 次循环后的室温轴向疲劳强度

热处理制度	K_t = 1 时的轴向强度/MPa	K_t = 3.8 时的疲劳强度/MPa
870℃/1 h，AC + 595℃/8 h，AC	793	380
910℃/1 h，AC + 595℃/8 h，AC	825	345

表 7.3-191　TC19 合金在不同显微组织的疲劳和抗拉强度数据

组织形态	$\sigma_{p0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%	ψ/%	10^7 次循环疲劳强度	
					光滑/MPa	缺口/MPa
10%等轴初生 α + 退火①	1 020	1 109	15	37	620	289
10%等轴初生 α + STA②	1 116	1 213	13	37	620	248
50%等轴初生 α + 退火	1 061	1 130	13	34	620	282
50%等轴初生 α + STA	1 151	1 240	14	42	675	262
50%等轴初生 α + STOA③	1 068	1 144	14	41	620	262
50%拉长初生 α + STA	1 096	1 206	10	23	751	276
20%拉长初生 α + STA	1 109	1 206	11	26	620	282
β锻造 + STA	1 047	1 199	7	13	675	262

① 退火—705℃，1 h，AC。
② STA = 885℃，1 h + 595℃，8 h，AC。
③ STOA = 885℃，1 h，AC + 705℃，1 h，AC。

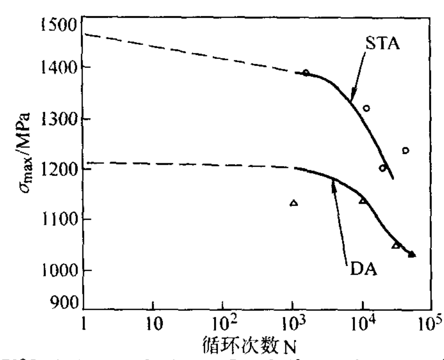


图 7.3-59 TC19 合金的低周疲劳数据

表 7.3-192 TC19 疲劳裂纹扩展与保压时间的关系

疲劳裂纹扩展 (ΔK) /MPa·$m^{1/2}$	保压时间 /min	开始到保压 da/dN /μm·周$^{-1}$	保压期间 da/dt /μm·min^{-1}	卸压 da/dN /μm·周$^{-1}$	总 da/dN /μm·周$^{-1}$
38.46	10	6.25	44.5	4.62	20.1
27.80	45	1.38	7.29	1.28	2.87
23.52	45	0.9	1.0	0.9	1.01

⑤ 冲击性能 见表 7.3-193 所示。

表 7.3-193 TC19 合金的冲击韧性

锻造温度 /℃	固溶温度①	冷却方式	时效温度②	V 形缺口冲击吸收功/J	极限抗拉强度/MPa
885	830	空冷	540	12.2	1 241
			595	13.5	1 255
		油淬	540	10.1	1 296
			595	14.9	1 268
	870	空冷	540	11.5	1 310
			595	9.5	1 248
		油淬	540	8.1	1 489
			595	8.1	1 324
915	830	空冷	540	10.8	1 193
			595	10.8	1 165
		油淬	540	10.8	1 337
			595	12.9	1 241
	870	空冷	540	12.2	1 255
			595	12.9	1 275
		油淬	540	9.5	1 461
			595	8.8	1 350

注：45 mm 厚镦粗锻件。
① 保温 1 h。
② 保温 8 h。

⑥ 断裂性能 见表 7.3-194 所示。

⑦ 弹性性能 固溶时效态的典型拉伸模量（室温）是 114 GPa。不同温度的弹性模量见表 7.3-195 所示。

表 7.3-194 TC19 合金不同锻造和热处理条件及端面厚度的锻件的断裂韧性

锻造条件	热处理制度	截面厚度 /mm	σ_b /MPa	K_{IC} /MPa·m$^{1/2}$
885℃，AC	870℃，2 h，AC + 595℃，8 h，AC	50	1 146	36.7
			—	33.5
900℃，AC	900℃，1 h，WQ + 650℃，8 h，AC	75	1 303	20.9
	900℃，1 h，AC + 650℃，8 h，AC	75	1 172	26.6
	915℃，1 h，AC + 595℃，8 h，AC	50	1 158	50.4
885℃，AC		50	1 158	65.8
980℃，WQ		25	1 220	32.6
885℃，AC	915℃，1 h，AC + 525℃，8 h，AC	25	1 220	46.0
980℃，WQ	915℃，1 h，AC + 525℃，8 h，AC	25	1 186	47.5
980℃，WQ	915℃，1 h，AC + 595℃，8 h，AC	75	1 220	39.0
900℃，AC	915℃，1 h，AC + 845℃，8 h，OQ + 595℃，8 h，AC	54	1 255	36.3
980℃，AC	845℃，1 h，OQ + 595℃，8 h，AC	75	1 186	37.2
		54	1 268	35.4
		38	1 296	27.7
885℃，AC	915℃，1 h，AC + 595℃，4 h，AC	75	1 186	33.7
		50	1 165	33.3
		25	1 234	29.9

表 7.3-195 TC19 拉伸弹性模量

温度 θ		弹性模量 E		屈服强度 $\sigma_{p0.2}$	
℃	℉	GPa	10^6psi	MPa	kpsi(0.2%)
20	70	130	18.9	1 165	169.0
315	600	107	15.5	834	121.0
425	800	100	14.5	787	114.2

注：应变速度是 0.005/min。

7.5 制造工艺和性能

1）热处理工艺和性能 TC19 可以采用多种热处理制度，包括退火或固溶处理和时效（见表 7.3-196 所示）。如果采用相对高的加工温度，固溶热处理的温度就要使用下限值。如果采用中等温度 $\alpha+\beta$ 加工，双重固溶处理时第一次在高温，第二次大约在 845℃，将得到期望的组织。锻件最终热处理包括两个阶段，固溶处理 + 淬火和时效，固溶处理是在相变点以下的 870 ~ 900℃进行，接着进行水或油淬和/或对于薄壁件可风扇空冷，时效在 535 ~ 620℃进行。

技术条件对锻造材料所规定的状态包括双重退火状态和固溶处理状态。这两种热处理制度规定如下：

双重退火：870℃，1 h，AC + 540℃，8 h，AC；

表 7.3-196　TC19 典型的热处理制度

热处理	温度/℃	时间/h	冷却方式
消除内应力退火	595～705	0.25～4	空或慢冷
固溶处理①	815～925	1	水或油淬
时效②	580～605	4～8	AC
过时效	>650	—	—

① 参见分表产品类型的特定温度。
② 最常用的时效温度 595℃。

固溶处理及时效：870℃，1 h，WQ+595℃，8 h，AC。

1.9 mm 厚度薄板的热处理制度为三重退火：

870℃，15 min，AC+720℃，15 min，AC +595℃，2 h，AC。

2）热变形工艺和性能　TC19 是比较好的锻造型合金，其单位压力（流变应力）、可锻性和裂纹敏感性与 α+β 型合金 Ti-6Al-4V 相似，锻件的最终显微组织，在特定的锻造方法下，是为达到特定组织和要求力学性能的热加工工艺而得到的，热加工采用在相变点以下和/或相变点以上相结合锻造，接着通过在相变点以下热处理，可以获得完全满足力学性能指标值。

相变点以下热加工（锻造和热处理），可以得到 β 基体组织上等轴 α（20%～40%）组织，从而增加强度、韧性，尤其是低周疲劳性能，相变点以上热加工（β 锻造+相变点以下热处理）获得转变的魏氏体 α 显微组织，可以提高蠕变和与断裂相关的性能，如疲劳裂纹扩张阻力。表 7.3-197 为 TC19 钛合金的锻件锻造加热温度。

表 7.3-197　TC19 合金的锻造加工温度

锻造工艺	温度/℃
传统锻造	845～915
β 锻造	955～1 010

3）焊接性能　TC19 合金是很难焊接的。推荐的熔覆金属是和合金基体一样的金属。

7.6　选材及应用

TC19 合金用于中等温度范围航空发动机压气机盘、风扇盘和叶片以及其他重要构件。该合金也应用于酸性深井勘测方面。但它的蠕变性能较 Ti-6242 合金低，可用于制造工作温度为 400℃下要求高强度的构件。

8　TC21 钛合金

TC21 是中合金化的 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Cr-Nb α+β 型两相结构钛合金，钼当量约为 5。具有自主知识产权，合金设计要求高强、高韧、损伤容限、可焊。希望在 500℃以下长期工作。

TC21 钛合金适合于制造各类结构锻件及零部件，在航空航天工业和民用行业中可望获得广泛应用。其主要半成品是板材、棒材、锻件等。

8.1　化学成分

Q/XB 1523—2002《航空用 TC21 钛合金棒材和锻坯》规定的化学成分见表 7.3-198。

8.2　物理及化学性能

1）相变温度　α+β↔β 相的转变温度为 955℃ ± 15℃。

2）显微组织　合金在平衡状态下由 α 相和大约 30% 的 β 相组成。

8.3　力学性能

1）技术标准规定的性能见表 7.3-199。

表 7.3-198　TC21 钛合金化学成分（质量分数）　%

主要元素							杂质≤						
Ti	Al	Mo	Nb	Sn	Zr	Cr	Si	Fe	C	N	H	O	其他杂质总和
基	5.25～6.75	2.25～3.25	1.75～2.35	1.75～2.35	1.65～2.45	0.75～1.75	0.20	0.15	0.08	0.05	0.015	0.15	0.40

表 7.3-199　技术标准规定的 TC21 钛合金性能

直径/mm	取样方向	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$	da/dN/mm·周$^{-1}$
10～75	纵向	热处理态	≥1 100	≥1 000	≥8	≥15	—	—
75～100	纵向		≥1 100	≥1 000	≥8	≥15	—	—
	横向		≥1 100	≥1 000	≥6	≥10	—	—
	C－R		—	—	—	—	≥70	与 TC4 相当
100～180	横向		≥1 100	≥1 000	≥6	≥10		
	C－R		—	—	—	—	≥70	与 TC4 相当

2）室温及各种温度下的力学性能　室温及各种温度下的拉伸性能见表 7.3-200。

表 7.3-200　TC21 钛合金直径为 20 mm 的棒材各种温度下的拉伸性能

θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
室温	1 220	1 100	18	58
400	950	810	20	60

续表 7.3-200

θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
450	920	800	22	72
500	860	770	21	70
550	820	720	27	85
600	690	560	40	95

8.4 制造工艺性能

1）热处理工艺和性能 棒材和锻件：840～950℃，1～2 h，空冷+550～650℃，3～5 h，空冷。

2）焊接工艺和性能 电子束弧焊接接头的力学性能见表7.3-201。

表7.3-201 TC21钛合金电子束弧焊接接头室温的力学性能

焊接材料	焊件直径/mm	焊前状态	焊后处理	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
棒材	20	退火	退火	1 160	1 075	13	54
	90			1 130	1 040	9	30
	120			1 000	910	10	30

8.5 选材及应用

在飞机结构中，TC21合金主要用于制造要求高强、高韧、损伤容限、可焊的承力零部件，可望在500℃下长期工作的工作。

TC21钛合金在民用行业中也将获得广泛应用。

9 Ti451钛合金

Ti451合金名义成分Ti-4.5Al-5Mo-1.5Cr，属一种α-β两相钛合金。该合金经过固溶时效处理后抗拉强度为1 000～1 100 MPa时断裂韧性K_{IC}为可达108.5～139.5 MPa·m$^{1/2}$，而Ti-6Al-4V合金在相同强度下，K_{IC}为62～77.5 MPa·m$^{1/2}$，两者的的机械加工性能相当。作为结构件使用，其最佳的综合性能匹配为：$\sigma_b \geqslant 1\ 200$ MPa，$\sigma_{p0.2} \geqslant 1\ 140$ MPa，$\delta \geqslant 8\%$，$\phi \geqslant 20\%$，$K_{IC} \geqslant 80$ MPa $\sqrt{m}$，与国内外同类合金相比，具有先进性。

该合金在飞行事故记录仪（黑匣子）、防弹装甲、轻型喷火器以及轻型战车上都可以推广应用。

1）材料牌号 Ti451。

2）相近牌号 Corona5（美国）。

9.1 化学成分

化学成分见表7.3-202。

表7.3-202 Ti451钛合金化学成分（质量分数）

%

合金元素				杂质≤						
Al	Mo	Cr	Ti	Fe	C	N	H	O	其他元素	
									单个	总和
4.25～4.75	4.5～5.5	1.0～2.0	余量	0.30	0.10	0.05	0.010	0.15	0.10	0.40

9.2 物理及化学性能

1）密度 $\rho = 4.56$ g/cm^3。

2）比热容见表7.3-203。

表7.3-203 Ti451钛合金比热容

θ/℃	300	400	500
c/J·kg^{-1}·K^{-1}	589.5	615.5	644.8

3）热导率见表7.3-204。

表7.3-204 Ti451钛合金热导率

θ/℃	100	200	300	400	500
λ/W·m^{-1}·K^{-1}	8.1	8.8	9.6	10.7	11.7

4）线胀系数见表7.3-205

表7.3-205 Ti451钛合金线胀系数

θ/℃	100	200	300	400	500
α/10^{-6}K^{-1}	8.36	8.50	8.88	9.52	10.15

5）磁性能 无磁性。

6）抗氧化性能 与工业纯钛相近。

9.3 相变

α+β↔β相的转变温度为920～935℃。

9.4 力学性能

1）技术标准规定的性能见表7.3-206。

表7.3-206 Ti451钛合金的基本力学性能

σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	δ_{10}/%	ψ/%
≥1 200	≥1 100	≥8	≥6	≥20

2）不同热处理后室温拉伸性能见表7.3-207。

表7.3-207 Ti451钛合金不同热处理后的力学性能

时效制度 845℃/4 h空冷后	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	α_{KU}/kJ·m^{-2}	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$
550℃，6 h，AC	1 040	930	13.4	29	460	94.4
590℃，6 h，AC	1 020	954	15.8	44.6	548	95.8
650℃，6 h，AC	945	881	17	48.4	892	133.4
710℃，6 h，AC	920	864	18	52	1 078	143.3
730℃，6 h，AC	923	862	19	52	951	133.4
750℃，6 h，AC	905	843	21	52	980	130.8

3）高温拉伸性能见表7.3-208。

表7.3-208 Ti451钛合金的高温拉伸性能

θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
100	1 100	967	9.1	35.5
200	1 030	889	10	41.4
300	960	783	10.3	43.7
350	918	728	10.8	48.3

4）高温冲击性能见表7.3-209。

表7.3-209 Ti451钛合金的高温冲击性能

θ/℃	100	200	300	350	400
α_{KU}/kJ·m^{-2}	294～510	441～862	676～823	784～862	764～931

注：实验标准YB900。

5）热稳定性见表7.3-210。

6）室温缺口拉伸 $\sigma_b^H \geqslant 1\ 700$ MPa。

7）室温应力-断裂实验 1 190 MPa下持续6 h未断。

8）室温疲劳极限 光滑式样：$\sigma_{-1} \geqslant 650$ MPa（$R = 0.1$，$N = 10^7$）。

表 7.3-210 Ti451 钛合金的热稳定性

热稳定条件		室温拉伸性能			
θ/℃	t/h	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
200	100	1 180 ~ 1 200	1 100 ~ 1 110	8.2 ~ 10.4	28.4 ~ 29.9
300	100	1 200 ~ 1 220	1 130 ~ 1 140	8.8 ~ 11.2	28.2 ~ 28.6
350	100	1 170 ~ 1 200	1 100 ~ 1 130	10 ~ 11.2	27.1 ~ 28.9
400	100	1 180 ~ 1 190	1 110 ~ 1 120	9.2 ~ 11.2	26.3 ~ 31.5
500	100	1 190 ~ 1 200	1 120 ~ 1 140	9.6 ~ 10.4	21.2 ~ 26.5

9）高温蠕变性能 $\sigma^{350}_{0.2/500} \geqslant 550$ MPa。

10）弹性模量见表 7.3-211。

表 7.3-211 Ti451 钛合金弹性模量

θ/℃	RT	100	200	300	400	500
E/GPa	122.4	119	113.7	108.3	102.5	97.3

11）切变模量：$G = 43$ GPa。

12）泊松比 $\mu = 0.35$。

9.5 制造工艺和性能

1）热处理工艺和性能

① 板材热处理工艺 890℃，2 h，WQ + 590℃，6 ~ 8 h，AC。

② 淬透深度 $\alpha \leqslant 75$ mm。

2）热变形工艺和性能

① 热轧板工艺 900℃，热轧，总变形量 70%左右。

② 弯曲角（6 mm）：≥15°（$\sigma_b \geqslant 1\,200$ MPa）

≥50°（$\sigma_b \geqslant 900$ MPa）

③ 扩口率（ϕ12 mm × 1 mm）：35%（顶芯锥度 60°）

④ 超塑性：在 790℃ ~ 870℃范围内具有超塑性，当应变率为 $0.833 \times 10^{-3}\,s^{-1}$时，$\delta = 500\%$

3）可焊性：焊接系数≥0.9

9.6 选材及应用

1）精锻棒的力学性能见表 7.3-212。

表 7.3-212 Ti451 钛合金精锻棒（ϕ30 mm）的力学性能

锻造参数	室温力学性能						备注
	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%	α_{KU} /kJ·m^{-2}	K_{IC} /MPa·m$^{1/2}$	
β锻 ε = 43.8%	923	878	19.7	51.8	957	126.4	845℃，4 h + 730℃，6 h，AC
α + β锻 ε = 43.8%	928	855	20.9	57.5	915	104.0	

2）热轧棒的力学性能见表 7.3-213。

表 7.3-213 Ti451 钛合金热轧棒（ϕ22 mm，β相区热轧）的力学性能

热处理制度	室温力学性能			
	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
900℃/4 h，油冷	1 200	1 010	11.6	7.94
855℃/4 h，油冷	1 000	446	17.6	36.2
855℃/4 h，水冷	1 010	451	18	36.4

续表 7.3-213

热处理制度	室温力学性能			
	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
870℃/4 h，空冷 + 635℃ /6 h，空冷	995	930	18.6	54.8

3）热轧板的力学性能见表 7.3-214、表 7.3-215。

表 7.3-214 Ti451 钛合金热轧板（板坯厚 22 mm）的力学性能

板厚 /mm	变形量 /%	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5/%	ψ/%	热处理
12	47	1 150 ~ 1 220	1 080 ~ 1 120	8 ~ 13	18 ~ 22	820℃，2 h，WQ + 590℃，8 h
10	56	1 210 ~ 1 220	1 140 ~ 1 100	8 ~ 9.5	13.6 ~ 19.0	
8	65	1 200 ~ 1 230	1 130 ~ 1 140	6.7 ~ 11.3	19.5 ~ 22.6	
6	73	1 210 ~ 1 220	1 150 ~ 1 160	9.7 ~ 10	19 ~ 19.5	
4	80	1 190 ~ 1 200	1 130 ~ 1 140	9.7 ~ 12.7	28.4 ~ 33.3	

表 7.3-215 Ti451 钛合金热轧板（1.1 mm）的力学性能

状态		σ_b/MPa		δ_5/%		弯曲角	
		横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向
冷轧态		1 183	1 130	6.83	8.5	33	27
大气退火	800℃，2 h，AC	1 010	943	13.7	16	38.5	—
	850℃，2 h，AC	1 000	1 026	10.5	9.9	48.5	47
	870℃，2 h，AC	900	—	2.0	—	37.5	—
	850℃，2 h + 620℃，6 h	1 097	1 037	7.33	14.0	19.5	—
	850℃，2 h + 710℃，6 h	980	917	12.7	15.3	27.5	35.5
真空退火	800℃，2 h	930	—	15.0	—	60	—
	850℃，2 h	968	—	16.5	—	79	—
	870℃，2 h	980	—	17.5	—	80	—

4）冷轧管材的力学性能见表 7.3-216。

表 7.3-216 Ti451 钛合金冷轧管材的力学性能

规格/mm	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%
ϕ27 × 1	冷轧态	1 107	956	4.6
	退火态	959	864	7.4
ϕ24 × 1	退火态	920	—	4.0
ϕ12 × 1	冷轧态	1 045	953	3.96
	800℃，2 h	902	853	8.91
	850℃，2 h	980	—	11.4
	870℃，2 h	802	703	17.3

5）典型样品见图7.3-60、图7.3-61。

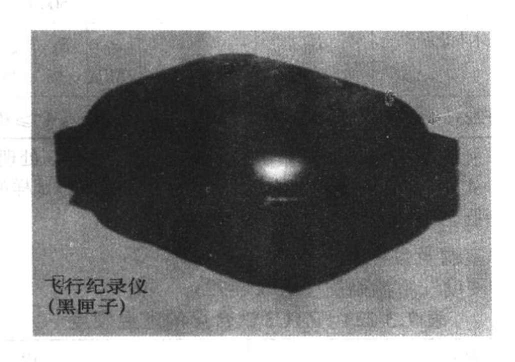


图7.3-60 飞行纪录仪（黑匣子）



图7.3-61 兵器用变壁厚轻型喷火器油瓶

10 ZTC3钛合金

ZTC3合金是我国自行研制的一种含有共析元素Si和稀土元素Ce的Ti-Al-Mo系α-β型两相铸造钛合金，它除了依靠传统的固溶强化外，还增加了析出难熔的稳定化合物质点强化，从而使该合金具有良好的综合性能：较高的室温强度，良好的铸造工艺性能（流动性和充填性），在500℃以下有优良的热强性能（高温强度、蠕变抗力、良好的热稳定性）。可在500℃温度下长期工作。

该合金已铸造了大量的航空发动机压气机机匣，经过试验考核和长期的使用证明：用该合金铸造的机匣质量稳定，性能良好、可靠。它除了制造机匣外，也可用于制造其他的结构件，如支架、壳体等。根据结构件的工作特性要求，该合金铸造的铸件，通常是在退火或热等静压状态下使用。

10.1 化学成分

根据下列相关技术标准GJB2896—1997《钛及钛合金熔模精密铸件规范》、HB5448—1990《钛及钛合金熔模精密铸件》的规定，表7.3-217为该合金的化学成分。

表7.3-217 ZTC3钛合金化学成分（质量分数） %

合金元素						杂质≤					其他元素①	
Al	Mo	Sn	Si	Ce	Ti	Fe	C	N	H	O	单个	总和
4.5～5.5	4.5～5.5	1.5～2.5	0.20～0.35	0.015～0.030	余量	0.20	0.10	0.05	0.012 5	0.18	0.10	0.30

① 产品出厂时供方可不检验其他元素，用户要求并在合同中注明时可予以检验。

10.2 物理及化学性能

1）密度 $\rho=4.60\ g/cm^3$。
2）熔化温度范围熔点约为1 700℃。
3）热导率见表7.3-218。

表7.3-218 ZTC3钛合金热导率

θ/℃	94	112	197	292	390	474	588	650
$\lambda/W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	8.4	9.2	9.6	10.9	12.6	14.2	15.9	17.2

4）比热容见表7.3-219。

表7.3-219 ZTC3钛合金比热容

θ/℃	100	300	500	800
$c/J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$	507	540	586	620

5）线胀系数见表7.3-220。

表7.3-220 钛合金线胀系数

θ/℃	20～100	20～200	20～300	20～400	20～500	20～600	20～700	20～800	20～900	20～1 000
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	9.1	9.4	9.4	9.5	9.6	9.7	9.9	10.1	10.5	10.8

6）电阻率见表7.3-221。

表7.3-221 ZTC3钛合金电阻率

θ/℃	94	112	197	292	390	474	588	650
$\rho/\mu\Omega\cdot m$	1.62	1.64	1.67	1.69	1.71	1.72	1.73	1.73

7）磁性能 无磁性。

8）抗氧化性能 ZTC3钛合金钛氧化开始温度高于工业纯钛和ZTC4钛合金。

9）耐腐蚀性能 ZTC3钛合金钛的耐腐蚀性能与ZTC4合金相当，但它们在这方面都不如工业纯钛。

10.3 相变及显微组织

ZTC3钛合金为α－β型两相合金，α＋β⇔β的转变温度为980℃±10℃。它的铸态显微组织是由从高温β相转变过来的片状或针状α相和约16%的β相组成，其中片状或针状α在β晶界内呈“网篮”状排列，片状α沿β晶界析出（见图7.3-62），原始β晶界被保留下来，通过电镜观察可以发现，组织中有细小的Ce_2O_3质点，这是合金中的元素Ce与一部分氧化合而形成的难熔高硬度的稳定化合物的质点（见图7.3-63），这种质点在合金高温蠕变时能够阻碍位错运动，



图7.3-62 ZTC3钛合金的铸态显微组织（×500）

从而产生强化效应。合金经650℃退火后的显微组织与铸态的显微组织差别不大，但随着退火温度的提高，β相含量要增加，片状或针状α相趋向于粗条化。合金经热等静压后显微组织要发生一定的变化，β晶界变粗，片状α增厚，局部区域（如存在缺陷处）的片状α趋向于等轴化（见图7.3-64）。



图7.3-63　ZTC3钛合金的电镜金相组织（×3700）

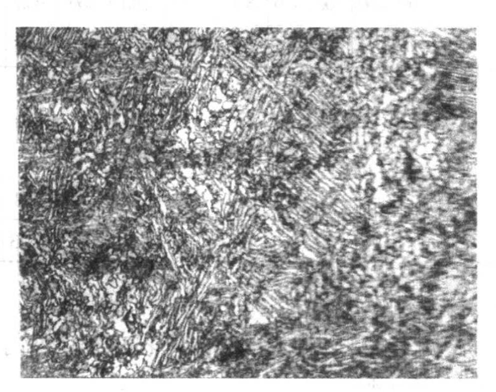


图7.3-64　HIP后的ZTC3钛合金的显微组织（×500）

10.4　力学性能

1）技术标准规定的性能见表7.3-222。

表7.3-222　ZTC3钛合金技术标准规定的性能

技术标准	品种	状态	取样方式	室温 σ_b/MPa	室温 $\sigma_{p0.2}$/Mpa	室温 δ_5/%	室温 ψ/%
GJB2896—1997	精密铸件	退火或热等静压①	附铸试样②	≥930	≥835	≥4	≥8
HB5448—1990	精密铸件	退火或热等静压①	附铸试样②	≥930	≥835	≥4	≥8
Q/6S448—1985	铸件	退火	试样	≥930	≥835	≥4	≥8
Q/6S449—1985	机匣铸件	退火	铸件	≥930	≥835	≥4	≥8
Q/12BY2237—1998	机匣铸件	真空退火	铸件	≥932	≥834	≥4	≥8

技术标准	室温 a_{KU}/kJ·m^{-2}	室温 HBS	500℃ σ_b/MPa	500℃ δ_5/%	500℃ ψ/%	500℃ σ_{100}/MPa
GJB2896—1997	—	—	≥570	—	—	≥520
HB5448—1990	—	—	—	—	—	—
Q/6S448—1985	≥195	≤345	≥590	≥4	≥8	≥540
Q/6S449—1985	≥175	≤345	≥570	≥4	≥8	≥520
Q/12BY2237—1998	≥177	255~345	≥588	≥4	≥10	≥540

①　航空航天工业用Ⅰ、Ⅱ类铸件必须经过热等静压处理。

②　从铸件上切取试样的室温力学性能允许比附铸试样的性能低5%。

2）室温及各种温度下的力学性能。

①　硬度　室温硬度见表7.3-223。

表7.3-223　ZTC3钛合金的室温硬度

品种	状态	硬度HB
试棒	退火	316
机匣铸件	退火	316

②　拉伸性能　各种温度下的拉伸性能见表7.3-224和表7.3-225。

表7.3-224　ZTC3钛合金各种温度下试棒的拉伸性能

品种	状态	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.1}$/MPa	$\sigma_{p0.01}$/MPa	δ_{10}/%	ψ/%
试棒	退火	20	1 024	889	775	7.8	12.6
试棒	退火	300	785	618	481	5.9	12.5
试棒	退火	400	750	587	452	5.8	14.6
试棒	退火	450	719	580	431	5.1	17.6
试棒	退火	500	685	553	405	5.8	19.6
试棒	退火	550	647	510	367	6.7	23.6

表7.3-225　ZTC3钛合金各种温度下机匣铸件的拉伸性能

品种	状态	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	$\sigma_{p0.01}$/MPa	δ_{10}/%	ψ/%
机匣铸件	退火	20	1 133	932	796	8.0	11.9
机匣铸件	退火	300	776	623	506	7.9	14.4
机匣铸件	退火	400	724	580	471	8.1	15.0
机匣铸件	退火	450	714	572	456	8.0	13.3
机匣铸件	退火	500	686	565	457	6.1	13.2
机匣铸件	退火	550	666	547	424	11.6	26.5

③　冲击性能　室温冲击韧度见表7.3-226。

表7.3-226　ZTC3钛合金室温冲击韧度

品种	状态	a_{KU}/kJ·m^{-2}
试棒	退火	275
机匣铸件	退火	282

④　扭转性能　试棒的扭转性能见表7.3-227。

表7.3-227　ZTC3钛合金扭转性能

品种	状态	θ/℃	τ_b/MPa	$\tau_{P0.3}$/MPa	$\tau_{P0.01}$/MPa
试棒	退火	20	834	614	534
试棒	退火	450	605	342	342

⑤ 应力集中 室温缺口抗拉强度及缺口敏感系数见表7.3-228。

表7.3-228 ZTC3钛合金室温缺口抗拉强度及缺口敏感系数

品种	状态	K_t	σ_{bH}/MPa	σ_{bH}/σ_b
试棒	退火	2.1	1 490	1.49
		3.1	1 470	1.47
		3.8	1 470	1.47
		5.0	1 460	1.46

室温缺口试样偏斜拉伸强度下降率见表7.3-229。

表7.3-229 ZTC3钛合金室温缺口试样偏斜拉伸强度下降率

品种	状态	K_t	偏斜角/(°)	σ_{bH}/MPa	η/%
试棒	退火	4.6	0	1 380	—
			4	873	36.7
			8	563	59.2

⑥ 热稳定性 试样热暴露后的室温拉伸性能见表7.3-230。

表7.3-230 ZTC3钛合金试样热暴露后的室温拉伸性能

品种	状态	热暴露条件		σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%
		θ/℃	t/h			
试棒	退火	未暴露		1 002	11.2	21.4
		500	1 000	1 000	10.6	21.2
			2 000	1 019	10.4	16.2
机匣铸件	退火	未暴露		1 004	11.1	21.0
		500	500	982	10.6	17.0
			1 000	1 000	10.6	21.1
			2 000	1 022	10.6	17.7

3）持久和蠕变性能

① 高温持久性能见表7.3-231

表7.3-231 ZTC3钛合金高温持久性能

品种	状态	θ/℃	σ_{100}/MPa	σ_{200}/MPa	σ_{300}/MPa
试棒	退火	400	696	—	—
		450	686	—	—
		500	588	—	—
		550	412	—	—
		600	226	—	—
机匣铸件	退火	400	686	—	—
		450	647	—	—
		500	588	569	549
		550	402	—	—

② 高温蠕变性能，见表7.3-232。

表7.3-232 ZTC3钛合金高温蠕变性能

品种	状态	θ/℃	$\sigma_{0.2/100}$/MPa
试棒	退火	400	530
		450	431
		500	294
机匣铸件	退火	450	471
		500	294

4）疲劳性能

① 高周疲劳 旋转弯曲疲劳极限见表7.3-233。

表7.3-233 ZTC3钛合金旋转弯曲疲劳极限

品种	状态	θ/℃	K_t	R	N/周	σ_D/MPa
试棒	退火	20	1	−1	2×10^7	196
		450				167

② 低周疲劳 应力控制低周疲劳性能见表7.3-234。

表7.3-234 ZTC3钛合金应力控制低周疲劳性能

品种	状态	θ/℃	K_t	R	f/Hz	K	σ_{max}/MPa	N/周
试棒	退火	20	2.4	0.1	0.2	0.5	657	4 585
					0.17	0.4	525	12 096
					0.17	0.3	394	53 066
		450	2.4	0.1	0.2	0.5	418	12 069
						0.4	335	>80 000
						0.3	248	>80 000
机匣铸件	退火	20	2.4	0.1	0.2	0.5	642	11 214
						0.4	413	22 496
						0.3	385	>80 000
		450	2.4	0.1	0.2	0.5	448	16 685
						0.4	358	>80 000
						0.3	269	>80 000

5）弹性性能

① 弹性模量见表7.3-325。

表7.3-235 ZTC3钛合金弹性模量

品种	试棒							
状态	退火							
θ/℃	20	200	300	400	450	500	550	600
E/GPa	112	—	101	93	91	87	82	—
E_D/GPa	120	114	110	101	98	94	94	91

② 切变模量见表7.3-236。

表7.3-236 ZTC3钛合金切变模量

品种	状态	θ/℃	G/GPa
试棒	退火	20	45
		450	35

③ 泊松比 室温泊松比 $\mu=0.25$。

10.5 制造工艺性能

1）铸造成形工艺 ZTC3钛合金具有良好的铸造性能，可借助石墨型（机加工石墨型或捣实石墨型）和熔模精铸型壳以及其他相对于熔融钛为惰性的铸型，采用离心或重力铸造成型各种形状的大、中、小型异型铸件，成型最小壁厚≥2 mm。该合金的铸造性能不如ZTC4钛合金。

2）热处理工艺 ZTC3钛合金铸造的铸件，根据它的工作特性要求，一些铸件通常只需采用去应力退火，退火工

艺：650℃，1～3 h，空冷或炉冷；对于航空航天工业用的Ⅰ、Ⅱ类铸件或其他重要用途的铸件，必须采用热等静压处理，热等静压处理工艺：温度 920℃ ± 10℃，高压 Ar 压力 100～140 MPa，时间 3.0～3.5 h，处理结束后，随炉冷至 300℃以下出炉。

3）焊接工艺　该合金具有可焊性，在焊接前建议将铸件预热至 100～200℃。焊接时要求在真空氩弧焊箱或相应的设备中进行。在焊接的工艺正常的情况下，焊接接头或补焊点的强度与基体的强度相近，但它的焊接性能不如 ZTC4 钛合金。该合金铸造的复杂或重要的铸件，在焊接或补焊后需经 650℃去应力退火处理。

4）机加工切削工艺　该合金的机加工切削工艺与不锈钢相近，加工时应采用低转速大进刀量，同时还应使用切削液冷却，以防刀具磨损和铸件发生氧化。

10.6 选材及应用

该合金为高温钛合金，可用于铸造在 500℃以下长期工作的各种静止异型结构件，已用该合金铸造生产了几百台航空发动机的压气机机匣（见图 7.3-65）并装机使用，经各种试验考核和近 20 年的正式应用，证明用该合金铸造的铸件性能良好、质量稳定、安全可靠。

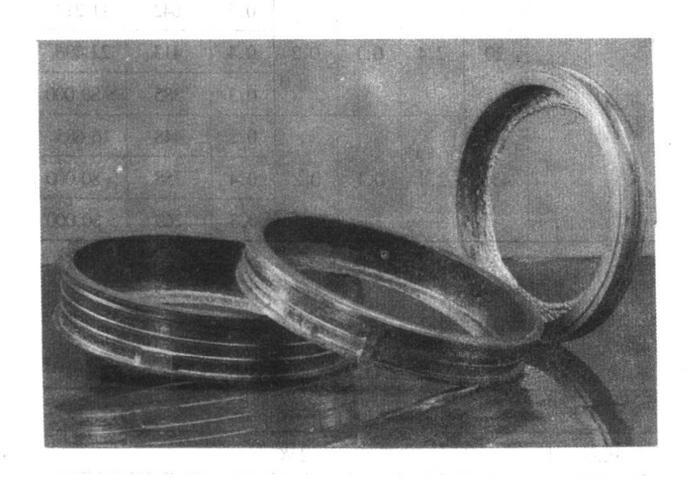


图 7.3-65　无芯离心铸造的 ZTC3 钛合金机匣铸件

11 ZTC4 钛合金

ZTC4 钛合金是一种中等强度的 α－β 型两相铸造钛合金，含有 6%α 稳定元素 Al 和 4%β 稳定元素 V。它具有良好的铸造性能、焊接性能以及耐腐蚀性能，是目前国内外应用最广泛的一种铸造钛合金。该合金通常在退火或热等静压状态下使用，可在 350℃以下长期工作，适合于制造各种静止的航空、航天以及其他方面的复杂薄壁异型结构件，如机匣、支架、壳体、框架等。从 20 世纪 80 年代中期开始，随着热等静压处理技术和一些强化热处理工艺，如固溶时效、氢处理等的发展和应用，铸件的质量得到了提高，合金的力学性能，特别是强度和疲劳性能获得了很大的改善和提高。该合金铸造的铸件已被开始应用到许多关键受力的部件上，以及一些小型的发动机的转速不太高的转动件上。目前已经在工业上使用的各种钛合金铸件中 80% 以上是用该合金铸造的。

1）材料牌号　ZTC4。

2）相近牌号　Ti-6Al-4V（美国），BT6Л（俄罗斯），G-TiAl6V4（德国）。

11.1 化学成分

根据 GB/T 15073—1994《铸造钛及钛合金牌号和化学成分》、GJB 2896—1997《钛及钛合金熔模精密铸件规范》的规定，该合金的化学成分列于表 7.3-237。

表 7.3-237　ZTC4 钛合金化学成分（质量分数）

%

合金元素			杂质≤							
Al	V	Ti	Fe	Si	C	N	H	O	其他元素②	
									单个	总和
5.5～6.8	3.5～4.5	余量	0.30①	0.15	0.10	0.05	0.015	0.20①	0.10	0.40

① GB/T 15073—1994 和 GB/T 6614—1994 规定 Fe≤0.40%，O≤0.25%。

② 产品出厂时供方可不检验其他元素，用户要求并在合同中注明时可予以检验。

11.2 物理及化学性能

1）密度 $\rho = 4.40\ g/cm^3$。

2）熔化温度范围 1 590℃ ± 30℃。

3）热导率见表 7.3-238。

表 7.3-238　ZTC4 钛合金热导率

θ/℃	100	200	300	400	500	600	700
$\lambda/W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	8.8	10.5	11.3	12.1	13.4	14.7	15.5

4）比热容见表 7.3-239。

表 7.3-239　ZTC4 钛合金比热容

θ/℃	200	300	400	500	600
$c/J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$	557	574	590	607	628

5）线胀系数见表 7.3-240。

表 7.3-240　ZTC4 钛合金线胀系数

θ/℃	20～100	20～200	20～300	20～400
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	8.9	9.3	9.5	9.5

6）电阻率室温电阻率 $\rho = 1.62\ \mu\Omega\cdot m$

7）磁性能　无磁性。

8）抗氧化性能　ZTC4 钛合金的抗氧化性能不如 ZTC3 钛合金，ZTC4 钛合金的氧化开始于 480℃，在 540℃以下长期暴露形成的轻度氧化对性能有一定影响，540℃以上则将导致严重的表面氧化和氧的扩散，并形成硬而脆的表面层（α层）。

9）耐腐蚀性能　ZTC4 钛合金具有较高的耐腐蚀能力，其耐蚀性优于不锈钢，但不如工业纯钛。该合金只有在浓度较高的硫酸、盐酸和正磷酸中才能发生反应（腐蚀）；在硝酸中反应很微弱；在海水中不受腐蚀；在氢氟酸中容易受腐蚀。

11.3 相变及显微组织

ZTC4 钛合金为 α－β 型两相合金，α＋β⇔β 相的转变温度为 975～1 005℃。它的铸态显微组织是由从高温 β 相转变过来的片状或针状 α 相和部分的 β 相组成，片状或针状的 α 相按一定的位向排列，原始的 β 晶界被清晰地保留下来（见图 7.3-66）。铸态显微组织受铸件冷却速度的影响，合金从高温 β 区冷却，在没有达到进行无扩散的马氏体转变速度时，α 相首先从 β 晶界开始生长，然后向晶内长大，形成交

叠编织的片状α。冷却速度慢时片状α变得又宽又短，在晶粒内部形成“网篮”状组织；冷却速度快时片状α变得又尖又长，甚至形成针状马氏体组织。

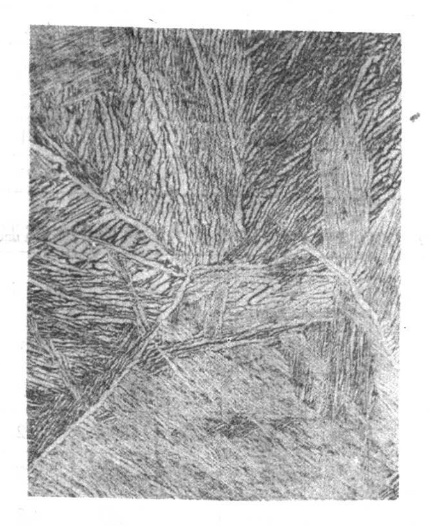


图 7.3-66 ZTC4 钛合金的铸态显微组织（×500）

合金在较低温度（如650℃以下）下退火，其组织与铸态组织差别不大（见图 7.3-67），但随着退火温度的提高，片状α可能发生积聚长大，尤其是冷却速度慢时，这将导致退火后的合金塑性低于铸态的塑性。

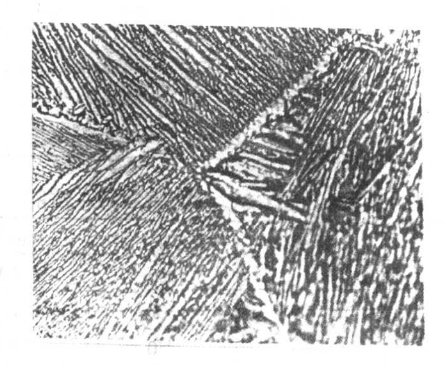


图 7.3-67 退火后的 ZTC4 钛合金显微组织（×500）

合金经热等静压（HIP）后，其显微组织会出现一些变化，β晶界变宽，片状α变宽变短，局部区域的α趋向于等轴化（见图 7.3-68）。

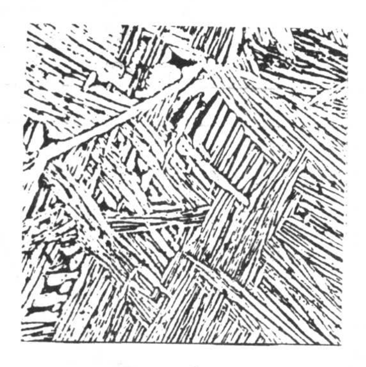


图 7.3-68 HIP 后的 ZTC4 钛合金显微组织（×500）

该合金如果进行强化热处理（固溶时效）和氢化处理，会使它的显微组织发生很大的变化（见图 7.3-69 和图 7.3-70），从而使它的性能获得很大的改善。

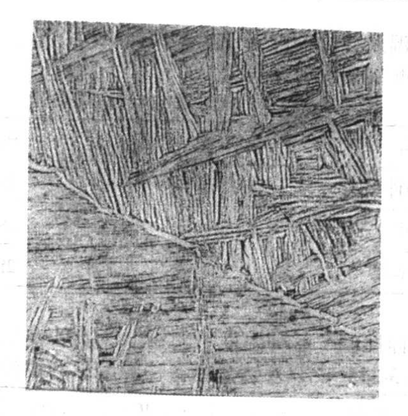


图 7.3-69 β固溶时效后的 ZTC4 钛合金显微组织（×500）

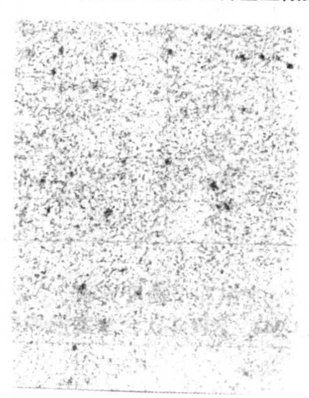


图 7.3-70 氢处理后的 ZTC4 钛合金显微组织（×500）

11.4 力学性能

1）技术标准规定的性能见表 7.3-241。

表 7.3-241 ZTC4 钛合金技术标准规定的性能

技术标准	品种	状态	取样方式	室温			
				σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
GB/T 6614—1994	铸件	退火或热等静压①	附铸试样②	≥895	≥825	≥6	—
GJB 2896—1997	精密铸件			≥835 (890)	≥765 (820)	≥5	≥12 (10)
HB 5447—1990	精密铸件			≥835 (890)	≥765 (820)	≥5	≥12 (10)
HB 5448—1990	精密铸件			≥835 (890)	≥765 (820)	≥5	≥12 (10)
Q/12BY 2237—1998	机匣铸件	真空退火	L	≥834	≥765	≥5	≥12

技术标准	室温		350℃	
	a_{KU}/kJ·m^{-2}	HBS	σ_b/MPa	σ_{100}/MPa
GB/T 6614—1994	—	≤365	—	—
GJB 2896—1997	—	—	≥500	≥490
HB 5447—1990	≥295	≤321（341）	≥500	≥490
HB 5448—1990	—	—	—	—
Q/12BY 2237—1998	≥294	—	—	—

注：当需方有要求时，可采用括号内的性能指标，此时应选用氧含量为0.15%～0.18%的母合金棒料或铸锭作为重熔电极。

① 航空航天工业用的Ⅰ、Ⅱ类铸件必须经过热等静压处理；

② 从铸件上切取试样的室温力学性能，允许比附铸试样的性能低5%。

2）室温及各种温度下的力学性能

① 硬度室温硬度见表7.3-242。

表7.3-242　ZTC4钛合金室温硬度

品种	状态	HBS
精铸件	热等静压	296
铸件	热等静压	299
机匣铸件	真空退火	289

② 拉伸性能　各种温度下的拉伸性能见表7.3-243。

表7.3-243　ZTC4钛合金各种温度下的拉伸性能

品种	状态	θ/℃	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%
铸件	退火	20	940	9.1	21.9
		200	679	12.9	30.6
		300	591	13.2	37.1
		350	552	13.9	36.5
		400	554	12.3	38.1
		450	550	11.2	39.7

③ 冲击性能　室温冲击韧度见表7.3-244。

表7.3-244　ZTC4钛合金室温冲击韧度

品种	状态	取样方式	a_{KU}/kJ·m^{-2}
铸件	热等静压	附铸试样	407
机匣铸件	真空退火	铸件	549

④ 扭转性能　室温扭转性能见表7.3-245。

表7.3-245　ZTC4钛合金室温扭转性能

品种	状态	τ_b/MPa	$\tau_{p0.3}$/MPa	$\tau_{p0.01}$/MPa
铸件	退火	707	544	494

⑤ 应力集中　室温缺口抗拉强度及缺口敏感系数见表7.3-246。

表7.3-246　ZTC4钛合金室温缺口抗拉强度及缺口敏感系数

品种	状态	K_t	σ_{bH}/MPa	σ_{bH}/σ_b
铸件	退火	2.5	1 460	1.5

室温缺口试样偏斜拉伸强度下降率见表7.3-247。

表7.3-247　ZTC4钛合金室温缺口试样偏斜拉伸强度下降率

品种	状态	K_t	偏斜角/(°)	σ_{bH}/MPa	η/%
铸件	退火	4.6	0	1 200	—
			4	1 059	11.7
			8	729	39.2

⑥ 热稳定性　试样热暴露后的室温拉伸性能见表7.3-248。

试样应力热暴露后的室温拉伸性能见表7.3-249。

3）持久和蠕变性能

① 高温持久性能见表7.3-250。

② 高温蠕变性能　高温蠕变强度见表7.3-251。

蠕变应力-塑性变形曲线见图7.3-71。

4）疲劳性能

① 高周疲劳　室温旋转弯曲疲劳极限见表7.3-252。

表7.3-248　ZTC4钛合金试样热暴露后的室温拉伸性能

品种	状态	热暴露条件		σ_b	$\sigma_{p0.2}$	δ_5/%	ψ/%
		θ/℃	t/h	/MPa	/MPa		
铸件	退火	未暴露		940	871	9.1	21.9
		200	100	909	849	8.1	19.0
		300	100	915	849	9.2	25.6
		350	100	885	823	8.4	22.1
		400	100	897	846	6.9	16.8

表7.3-249　ZTC4钛合金试样应力热暴露后的室温拉伸性能

品种	铸件	热暴露条件			σ_b	δ_5/%	ψ/%
		θ/℃	σ/MPa	t/h	/MPa		
铸件	退火	未暴露			940	9.1	21.9
		200	147	100	883	9.3	21.6
			294		893	8.2	18.7
			441		893	8.7	23.5
		300	147	100	887	8.2	17.1
			294		895	9.1	21.8
			441		891	9.6	21.6
		350	147	100	888	8.1	22.3
			294		874	8.6	18.8
			441		894	8.4	19.4
		400	147	100	892	9.5	22.7
			294		891	8.5	20.7
			441		897	9.7	24.1

表7.3-250　ZTC4钛合金高温持久性能

品种	状态	θ/℃	σ_{100}/MPa
铸件	退火	200	608
		300	569
		350	539
		400	510

表7.3-251　ZTC4钛合金高温蠕变强度

品种	状态	θ/℃	$\sigma_{0.2/100}$/MPa
铸件	退火	350	392
		400	343
		450	215

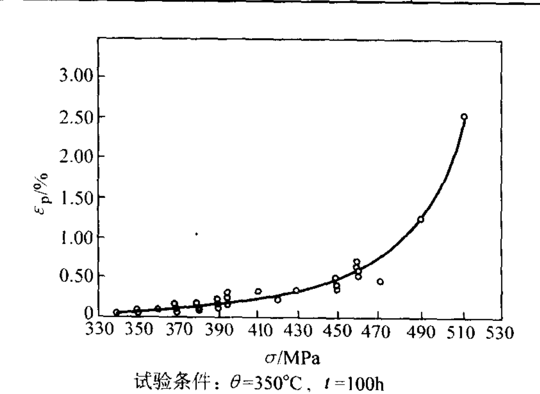


图7.3-71　退火ZTC4钛合金铸件的蠕变应力-塑性应变曲线

表 7.3-252 ZTC4 钛合金室温旋转弯曲疲劳极限

品种	状态	K_t	R	f/Hz	N/周	σ_D/MPa
铸件	退火	1	-1	50	10^7	226
		2	-1	50	10^7	196

缺口试样室温旋转弯曲疲劳 S-N 曲线见图 7.3-72。

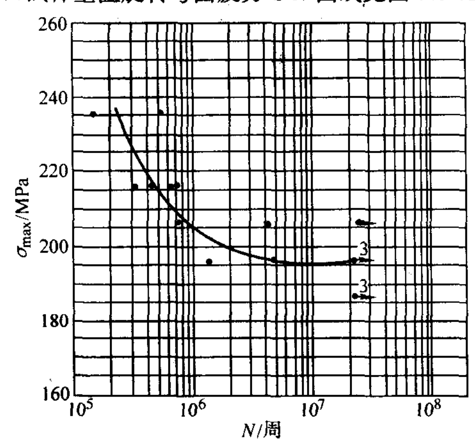


图 7.3-72 ZTC4 钛合金梅花试棒缺口试样（$K_t=2$）室温旋转弯曲疲劳 S-N 曲线

材料品种：梅花试棒
热处理状态：700℃，1 h 空冷
材料强度：$\sigma_b=892$ MPa
试样尺寸：$d=5$ mm
加载方式：旋转弯曲
应力比：-1
试验频率：50 Hz
试验环境：20℃，空气
试样数：20

室温轴向加载疲劳极限见表 7.3-253。

表 7.3-253 ZTC4 钛合金室温轴向加载疲劳极限

品种	状态	K_t	R	f/Hz	N/周	σ_D/MPa
试棒	热等静压	1	0.1	130	10^7	490
铸件	退火	1	0.1	133	10^7	196
		2.3	0.1	126	10^7	167

② 低周疲劳 室温应力控制低周疲劳性能见表 7.3-254。

表 7.3-254 ZTC4 钛合金室温应力控制低周疲劳性能

品种	状态	K_t	R	f/Hz	K	σ_{ma}/MPa	N 周
铸件	退火	2.3	0.1	0.17	0.9	783	1 535
					0.8	671	3 175
					0.6	559	6 074
					0.5	447	17 291

5）弹性性能

① 弹性模量见表 7.3-255。

表 7.3-255 ZTC4 钛合金弹性模量

品种	状态	θ/℃	E/GPa
铸件	退火	20	114
		350	96

② 切变模量 室温切变模量 $G=44$ GPa。

③ 泊松比 室温泊松比 $\mu=0.29$。

11.5 制造工艺和性能

1）铸造成型工艺和性能 该合金为铸造合金，由于其中含有6%Al，使它含有较大的结晶热，同时又含有4%同晶形β稳定元素V，使该合金具有比较窄的结晶温度间隔，这两个因素同时作用的结果，使得该合金具有良好的流动性（见表7.3-256），但其补缩能力不如铸钢，因此铸件的浇冒系统应设计得比铸钢件大，补缩冒口的数量也应多一些，并应尽量采用底注和离心铸造。可以采用相对于熔融钛为惰性的各种铸型：机加工石墨型、捣实石墨型、特种砂型以及熔模精铸型壳等，重力铸造或离心铸造各种不同形状复杂的大、中、小型厚薄壁异型铸件，目前最小的壁厚（局部）可达0.8～0.9 mm。

表 7.3-256 ZTC4 钛合金铸造性能

熔炼方法	铸件铸造方法	θ/℃		冷却条件	流动性 mm	线收缩率 /%
		熔化	浇注			
真空自耗电极电弧凝壳炉熔炼	离心铸造	1 650（液相线）	1 850～2 000	真空中	510①	1.1
		1 590（固相线）				

① 采用截面积为 0.75 cm² 的三角形螺旋形石墨铸型测定。

2）热处理工艺和性能 ZTC4 钛合金的铸件，根据它的工作特性要求，采用去应力退火、退火（完全退火）、热等静压处理，特殊要求的铸件采用真空双重退火和强化热处理。

① 去应力退火 一般用途的铸件，如Ⅲ、Ⅳ类铸件和化工用的铸件，通常采用去应力退火即可，退火工艺600℃～650℃，1～3 h，空冷或炉冷。

② 退火 退火也称完全退火，要求彻底消除应力的铸件，应采用完全退火，退火工艺700～850℃，1～3 h，空冷或炉冷。

③ 热等静压 航空、航天工业用的Ⅰ、Ⅱ类铸件或其他重要用途的铸件，要求必须进行热等静压处理，处理工艺：920℃±10℃，高压氩气100～140 MPa，2.0～2.5 h，处理结束后随炉冷至300℃以下出炉。

④ 特殊热处理

a）真空双重退火 要求调整铸件的组织结构，提高其结构和组织稳定性的铸件，可以采用真空双重退火，退火工艺见表7.3-257。

表 7.3-257 ZTC4 钛合金真空双重退火工艺

次数	真空度/Pa	退火温度/℃	保温时间/h	冷却方式
第一次	1.33×10^{-1}～1.33×10^{-3}	900±15	2	随炉冷至100℃后出炉
第二次	1.33×10^{-1}～1.33×10^{-3}	700±15	2	随炉冷至100℃后出炉

b）强化热处理或氢处理 要求强度高、疲劳性能好的铸件，可以采用强化热处理（如ABST、BST等）或氢处理，具体工艺可参考有关资料。

3）焊接工艺和性能 通常采用惰性气体（一般为氩气）保护的钨极氩弧补焊技术补焊铸件的缺陷和焊接铸件，其焊接性能良好，焊接接头的强度和耐腐蚀性与基体金属相近。表7.3-258为ZTC4钛合金手工钨极氩弧焊焊接接头的抗拉强度。焊接接头或补焊过的铸件必须进行去应力退火。

表 7.3-258 ZTC4 钛合金手工钨极氩弧焊焊接接头的抗拉强度

品种	状态	θ/℃	σ_b/MPa
铸件	退火	20	936
		350	559
	焊接 + 退火	20	909
		350	570

4）机加工切削性能 该合金的机加工切削性能与不锈钢相近，车削时形成的是带状切屑，易使刀具磨损，加工时，应采用低速（20 ~ 30 m/min）大进刀量，选择合适的刀具材料和工艺参数，同时应采用氯化冷却液冷却，以延长刀具寿命，改善铸件加工表面质量。

5）表面处理工艺 ZTC4 钛合金表面可以渗氮处理。经渗氮处理后，表面层的显微组织发生明显变化，硬度显著提高，虽然力学性能有所降低，但耐磨性得到较大改善。该合金经 920℃，30 h 的渗氮处理后表面呈金黄色，渗氮层深度约为 0.06 mm，其显微硬度随深度的变化见图 7.3-73，渗氮处理前后的力学性能见表 7.3-259。

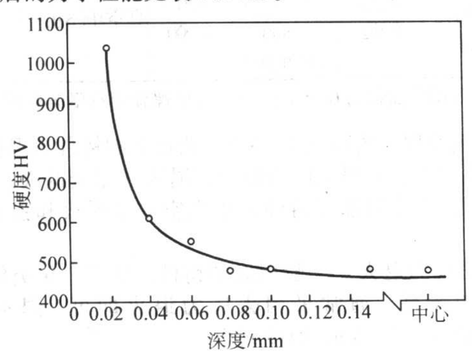


图 7.3-73 ZTC4 钛合金渗氮处理后的表面层显微硬度与深度的关系

表 7.3-259 ZTC4 钛合金渗氮处理前后的力学性能

品种	状态	θ/℃	σ_b /MPa	δ_5/%	ψ/%	a_{KU} /kJ·m^{-2}
铸件	退火	20	849	7.7	16.0	535
		350	532	10.8	41.5	—
	渗氮处理后	20	779	5.0	11.2	411
		350	440	13.0	50.2	—

11.6 选材及应用

该合金是中强合金，可用于铸造在 350℃下长期工作的各种异型结构件。它是目前国内外应用量最多（占已使用钛合金铸件总量的 85%），使用范围最广的一种铸造钛合金，不仅限于航空、航天、造船及石油化工等部门使用，而且已被用于铸造医疗卫生和汽车以及建筑上的各种构件。从 20 世纪 90 年代开始，已被大量用于铸造运动器具——高尔夫球头和其他民用铸件（见图 7.3-74），目前全世界用 ZTC4 钛合金铸造的高尔夫球头每年达到几百万个。图 7.3-75 和图 7.3-76分别是用石墨型和熔模精铸型壳铸造的航空、航天用 ZTC4 钛合金铸件。从 20 世纪 80 年代中开始，随着热等静压技术和一些强化热处理工艺，如固溶时效、氢处理等的发展和应用，铸件的质量和可靠性得到了很大的提高，合金的力学性能，特别是强度和疲劳性能获得很大的改善和提高。从此以后，该合金的铸件已被开始应用到许多关键受力的部件上，如美国的 V－22 飞机的变速连接装置构件（见图 7.3-77）以及一些转速不太高的转动件上（见图 7.3-74）。



图 7.3-74 ZTC4 钛合金多精铸高尔夫球头及其他民用铸件

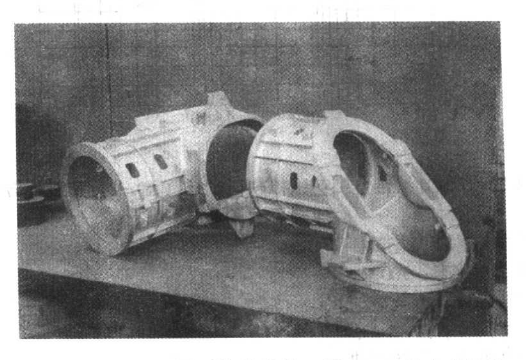


图 7.3-75 用石墨型铸造的航天用 ZTC4 钛合金铸件



图 7.3-76 用熔模精铸型壳铸造的航空发动机用 ZTC4 钛合金铸件

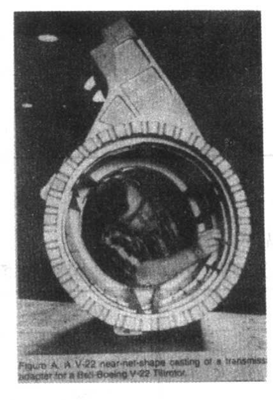


图 7.3-77 V－22 飞机用的 ZTC4 钛合金精铸变速连接装置构件

12 ZTC5 钛合金

ZTC5 钛合金属于 Ti-Al-Mo-Sn-Zr 系的马氏体型 α-β 合金，依靠多元素固溶强化和共析化合物的弥散强化获得高强度，被作为组织结构稳定的高强度铸造钛合金使用。它具有良好的综合性能，在常温下具有高的强度（$\sigma_b \geqslant 1\,000$ MPa）和韧性（断裂韧度可达 75 MPa $\sqrt{m}$），并有良好的热稳定性，可在 350℃以下长期工作。该合金铸造工艺性能好，无热裂倾向，在工业生产中采用消除铸件中残余铸造应力的退火后即可使用。该合金可取代部分结构钢，适合于制造航空航天工业的各种静止的高强度结构件。

1）材料牌号　ZTC5。

2）相近牌号　BT26Л（俄罗斯）。

12.1 化学成分

根据 GJB 2896—1997《钛及钛合金熔模精密铸件规范》的规定，该合金的化学成分见表 7.3-260

表 7.3-260　ZTC5 钛合金化学成分（质量分数）　%

合金元素								杂质≤						
Al	Mo	V	Fe	Cu	Sn	Zr	Ti	Si	C	N	H	O	其他元素① 单个	其他元素① 总和
5.0 ~ 6.0	2.5 ~ 3.5	1.0 ~ 2.0	0.5 ~ 1.5	0.8 ~ 1.2	1.0 ~ 2.0	3.0 ~ 4.0	余量	0.15	0.10	0.05	0.015	0.20	0.10	0.40

① 产品出厂时供方可不检验其他元素，用户要求并在合同中注明时可予以检验。

12.2 物理及化学性能

1）密度 $\rho = 4.62$ g/cm³。

2）熔化温度范围 1 560℃ ± 20℃。

3）热导率见表 7.3-261。

表 7.3-261　ZTC5 钛合金热导率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
λ/W·m⁻¹·K⁻¹	8.4	9.5	11.1	12.7	14.2	15.5	17.4

4）比热容见表 7.3-262。

表 7.3-262　ZTC5 钛合金比热容

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
c/J·kg⁻¹·K⁻¹	699	733	766	795	816	841	862

5）线胀系数见表 7.3-263。

表 7.3-263　ZTC5 钛合金线胀系数

θ/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400
α/10⁻⁶K⁻¹	7.4	8.5	8.7	9.2

6）电阻率见表 7.3-264。

表 7.3-264　ZTC5 钛合金电阻率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
ρ/μΩ·m	1.71	1.74	1.77	1.80	1.81	1.81	1.82

7）磁性能　无磁性。

8）抗氧化性能　ZTC5 钛合金在 350℃以下有较好的抗氧化性能，可长期稳定工作。

9）耐腐蚀性能 ZTC5 钛合金在大气和海水中稳定，有较高的耐腐蚀性能。

12.3 相变及显微组织

ZTC5 钛合金为马氏体型 α + β 两相合金，α + β⟷β 的转变温度为 940℃ ± 10℃。合金铸态和退火状态为魏氏组织，由晶内片状 α 相和晶界 α 相组成，β 相存在于片状 α 相之间。图 7.3-78 为该合金的铸态显微组织。合金经热等静压处理后，其显微组织要发生一定的变化，其变化情况与 ZTC4 合金相似。

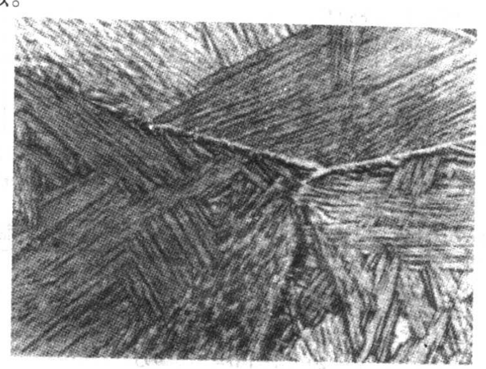


图 7.3-78　ZTC5 钛合金的铸态显微组织（×500）

12.4 力学性能

1）技术标准规定的性能见表 7.3-265。

表 7.3-265　ZTC5 钛合金技术标准规定的性能

技术标准	品种	状态	取样方式	室温 σ_b/MPa	室温 $\sigma_{p0.2}$/MPa	室温 δ_5/%	室温 ψ/%
GJB 2896—1997	精密铸件	退火或热等静压①	附铸试样②	≥1 000	≥910	≥4	≥8
Q/6S782—1989	精密铸件			≥1 050	≥950	≥4	≥8
Q/3AJ72J2—1990	精密铸件			≥1 000	≥910	≥4	≥8

技术标准	室温 a_{KU}/kJ·m⁻²	室温 K_{IC}/MPa·m^1/2	室温 HBS	350℃ σ_b/MPa	350℃ σ_{100}/MPa
GJB 2896—1997	—	—	—	—	—
Q/6S782—1989	≥200	—	≤340	≥900	≥800
Q/3AJ72J2—1990	≥190	≥60	—	—	—

① 航空航天工业用的第Ⅰ、Ⅱ类铸件必须经过热等静压处理。

② 从铸件上切取试样的室温力学性能，允许比附铸试样的性能低 5%。

2）室温及各种温度下的力学性能

① 硬度　室温硬度见表 7.3-266。

表 7.3-266　ZTC5 钛合金室温硬度

品种	状态	硬度 HB
试棒	铸态	330
	热等静压	326
	540℃，8 h，空冷	340

② 拉伸性能　室温拉伸性能见表 7.3-267。各种温度下的拉伸性能见表 7.3-268。

③ 冲击性能　室温冲击韧度见表 7.3-269。

表 7.3-267 ZTC5 钛合金室温拉伸性能

品种	状态	σ_b	$\sigma_{p0.2}$	$\sigma_{p0.01}$	δ_5	ψ
		MPa			%	
单铸试棒	铸态	1 068	973	—	7.3	13.8
	热等静压①	1 033	956	—	9.5	18.1
	热等静压① +580℃，8 h，空冷	1 133	—	—	5.8	13.1
	540℃，8 h空冷	1 094	995	829	7.7	11.6
	热等静压① +880℃，1 h，空冷 +580℃，8 h，空冷	1 169	—	—	5.4	12.5
附铸试棒	热等静压② +580℃，8 h空冷	1 054	997	—	14.3	22.5

① 热等静压处理工艺：900℃，133 MPa，2 h，冷速 32～34℃/min。
② 热等静压处理工艺：900℃，133 MPa，2 h，冷速 3～5℃/min。

表 7.3-268 ZTC5 钛合金各种温度下的拉伸性能

品种	状态	θ/℃	σ_b	$\sigma_{p0.2}$	δ_5	ψ
			MPa		%	
单铸试棒	540℃，8 h，空冷	20	1 094	995	7.7	11.6
		300	915	756	8.6	19.2
		350	901	734	8.6	20.3

表 7.3-269 ZTC5 钛合金室温冲击韧度

品种	状态	a_{KU}/kJ·m^{-2}
单铸试棒	铸态	351
	热等静压①	360
	540℃，8 h，空冷	266

① 热等静压处理工艺：900℃，133 MPa，2 h，冷速 32～34℃/min。

④ 扭转与剪切性能 室温扭转性能见表 7.3-270。

表 7.3-270 ZTC5 钛合金室温扭转性能

品种	状态	τ_b	$\tau_{p0.3}$	$\tau_{p0.01}$
		MPa		
单铸试棒	540℃，8 h，空冷	913	686	525

室温剪切性能见表 7.3-271。

表 7.3-271 ZTC5 钛合金室温剪切性能

品种	状态	τ/MPa
单铸试棒	540℃，8h，空冷	761

⑤ 应力集中 室温缺口抗拉强度及缺口敏感系数见表 7.3-272。

表 7.3-272 ZTC5 钛合金室温缺口抗拉强度及缺口敏感系数

品种	状态	K_t	σ_{bH}/MPa	σ_{bH}/σ_b
单铸试棒	540℃，8 h，空冷	3	1 632	1.49

室温缺口试样偏斜拉伸强度下降率见表 7.3-273。

表 7.3-273 ZTC5 钛合金室温缺口试样偏斜拉伸强度下降率

品种	状态	K_t	偏斜角 /(°)	σ_{bH} /MPa	η/%
单铸试棒	540℃，8 h，空冷	3	0	1 405	—
			4	1 072	23.7
			8	550	60.9

⑥ 热稳定性 试样热暴露后的室温拉伸性能见表 7.3-274。

表 7.3-274 ZTC5 钛合金试样热暴露后的室温拉伸性能

品种	状态	热暴露条件 θ/℃	热暴露条件 t/h	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ/%
单铸试棒	540℃，8 h，空冷	未暴露		1 094	995	7.7	11.6
		300	100	1 130	1 047	4.8	12.6

3）持久和蠕变性能

① 高温持久性能见表 7.3-275。

表 7.3-275 ZTC5 钛合金高温持久性能

品种	状态	θ/℃	σ_{100}/MPa
单铸试棒	540℃，8 h，空冷	350	800

② 高温蠕变性能见表 7.3-276。

表 7.3-276 ZTC5 钛合金高温蠕变性能

品种	状态	θ/℃	$\sigma_{0.1/100}$/MPa	$\sigma_{0.2/100}$/MPa
单铸试棒	540℃，8 h，空冷	400	530	550

4）疲劳性能

① 高周疲劳 室温轴向加载疲劳极限见表 7.3-277。

表 7.3-277 ZTC5 钛合金室温轴向加载疲劳极限

品种	状态	K_t	R	f/Hz	N/周	σ_D/MPa
单铸试棒	540℃，8 h，空冷	1	0.1	130	10^7	490
		3	0.1	130	10^7	240

② 低周疲劳 室温应力控制低周疲劳性能见表 7.3-278。

表 7.3-278 ZTC5 钛合金室温应力控制低周疲劳性能

品种	状态	θ/℃	K_t	R	f /Hz	K	σ_{max} /MPa	N/周
单铸试棒	540℃，8 h，空冷	20	2.3	0.1	0.17	0.7	980	1 664
						0.5	700	10 975
						0.3	420	>118 463

5）弹性性能

① 弹性模量见表 7.3-279。

表 7.3-279 ZTC5 钛合金弹性模量

品种	状态	θ/℃	E/GPa
单铸试棒	540℃，8 h，空冷	20	119.0
		300	97.6
		350	92.3

② 切变模量见表7.3-280。

表7.3-280 ZTC5钛合金切变模量

品种	状态	θ/℃	G/GPa
单铸试棒	540℃，8 h，空冷	20	44.1

③ 泊松比　室温泊松比 $\mu=0.35$。

6）断裂性能

① 断裂韧度　室温断裂韧度见表7.3-281。

表7.3-281 ZTC5钛合金室温断裂韧度

品种	状态	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$
单铸试棒	铸态	76.6
	540℃，8 h，空冷	73.2
附铸试棒	热等静压[①] + 580℃，8 h，空冷	82.2

① 热等静压处理工艺：900℃，133 MPa，2 h，冷速32～34℃/min。

② 疲劳裂纹扩展速率　室温 $da/dN-\Delta K$ 曲线见图7.3-79。

12.5 制造工艺性能

1）铸造成型工艺　ZTC5钛合金中含有Al、Sn、Cu等合金元素，具有良好的铸造性能，可以借助石墨型或熔模精铸型壳，采用离心铸造或重力铸造浇注各种不同形状的复杂薄壁异型铸件。

2）热处理工艺　一般铸件采用去应力退火，去应力退火工艺：550～650℃，2 h，空冷或炉冷。

航空、航天用的Ⅰ、Ⅱ类铸件或其他重要用途的铸件必须进行热等静压处理，热等静压工艺：温度900℃±10℃；高压氩气100～140 MPa，时间2.0～2.5 h，处理结束后随炉冷至300℃以下出炉。

3）焊接工艺　ZTC5钛合金的焊接性能良好，在真空氩弧焊箱中采用钨极氩弧焊焊接的接头和补焊点的强度与基体相近。焊接或补焊过的铸件必须进行去应力退火处理。

4）机加工切削工艺　ZTC5钛合金的机加工切削工艺与ZTC4钛合金相似。

12.6 选材及应用

该合金为高强铸造合金，能够在350℃以下长期工作，可取代部分结构钢，适合于制造航空航天工业以及其他重要用途的各种异型静止高强度结构件，而且已经用熔模精铸型壳离心铸造了后减速板支臂铸件，经过试验考核和飞行试验证明：铸件质量良好，性能稳定，满足设计和使用要求。但由于该合金是新研制的高强铸造钛合金，使用经验和应用范围有待积累与开发。

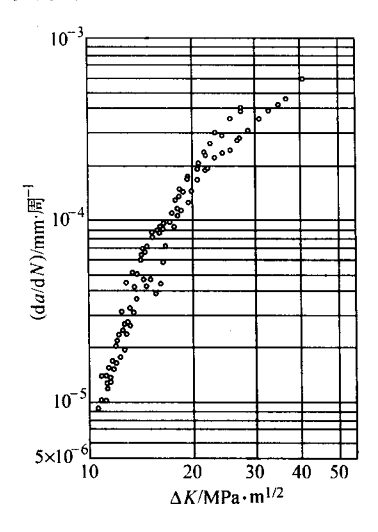


图7.3-79 ZTC5钛合金室温 $da/dN-\Delta K$ 曲线

材料品种：单铸试棒
热处理状态：540℃，8 h，空冷
材料强度：$\sigma_b=1\,094$ MPa，$\sigma_{p0.2}=995$ MPa
试样类型：CT　$B=200$ mm，$W=80$ mm
加载方式：轴向
应力比：0.1
试验频率：13.3 Hz
试验环境：20℃，空气
试样个数：3
试验点数：61
拟合公式：$da/dN=C\ (\Delta K)^n$
$C=7.0\times10^9$
$N=3.253\,4$

编写：王金友（北京航空材料研究院）
王庆如（北京航空材料研究院）
马济民（北京航空材料研究院）
李四清（北京航空材料研究院）
沙爱学（北京航空材料研究院）
何　瑜（宝鸡有色金属加工厂）
魏寿庸（宝鸡有色金属加工厂）
赵永庆（西北有色金属研究院）
曲恒磊（西北有色金属研究院）
于振涛（西北有色金属研究院）
谢成木（北京航空材料研究院）

第4章 β和近β型钛合金

1 TB2钛合金

TB2合金是一种亚稳定β型钛合金，其名义成分为Ti-5Mo-5V-8Cr-3Al，含有同晶型β稳定元素Mo和V，共析型β稳定元素Cr，α稳定元素Al。Mo当量为22.2。该合金在固溶处理状态下具有良好的冷成形性能和焊接性能，在固溶时效状态下具有高的强度和良好的塑性相匹配。

该合金的主要半成品有板材、带材、箔材、棒材、丝材和锻件等。板材可制成钣金件、压力容器、固体火箭发动机壳体。带材可制成星箭连接带。箔材可制成波纹壳体和蜂窝结构。丝材可冷镦出各种头型螺钉，并能冷铆和热铆，铆钉在固溶处理状态镦铆后直接使用。棒材能冷镦出各种头型螺栓，可在固溶处理状态或固溶时效状态下使用。

该合金适合于制造在300℃以下工作的航空紧固件，也适合于制造在500℃以下短时工作的航天紧固件。

1.1 化学成分

根据GB/T 3620.1—1994《钛及钛合金牌号》；GB/T 3620.2—1994《钛及钛合金加工产品化学成分及成分允许偏差》；K/JC2—1984《通信卫星‘星箭连接带’用TB2合金带材暂行技术规范》和GJB 2219—1994《紧固件用钛及钛合金棒（线材）规范》规定的化学成分，见表7.4-1。

表7.4-1 TB2钛合金化学成分（质量分数） %

合金元素					杂质≤						
Mo	V	Cr	Al	Ti	Fe	C	N	H	O	其他元素	
										单个	总和
4.7~5.7	4.7~5.7	7.5~8.5	2.5~3.5	余量	0.3	0.05	0.04	0.015	0.15	0.1	0.4

1.2 物理及化学性能

1）密度 $\rho=4.83\ g/cm^3$。

2）热导率见表7.4-2。

表7.4-2 TB2钛合金热导率

θ/℃		100	200	300	400	500	600
$\lambda/W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	固溶处理	8.9	10.9	12.6	14.7	16.3	16.8
	固溶处理	8.2	10.8	11.9	13.1	14.7	16.3

3）比热容见表7.4-3。

表7.4-3 TB2钛合金比热容

θ/℃		100	200	300	400	500	600
$c/J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$	时效处理	523	540	557	574	590	607

4）线胀系数见表7.4-4。

表7.4-4 TB2钛合金线胀系数

θ/℃		20~100	20~200	20~300	20~400	20~500	20~600
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	固溶处理	8.5	9.3	9.5	9.7	9.8	10.0
	固溶时效	8.7	9.1	9.4	9.7	9.8	10.8

5）电阻率见表7.4-5。

表7.4-5 TB2钛合金电阻率

θ/℃		20	100	200	300	400	500
$\rho/\mu\Omega\cdot m$	固溶处理	1.55	1.51	1.50	1.49	1.48	1.47
	固溶时效	1.36	1.36	1.41	1.44	1.47	1.50

6）磁性能　无磁性。

7）抗氧化性能　参见TC4钛合金。

8）耐腐蚀性能　TB2合金具有良好的耐蚀性和抗接触腐蚀性能。不锈钢与其接触基本上不产生腐蚀。铝合金及结构钢与其接触，该合金本身不发生腐蚀，而是异种金属被腐蚀。该合金经阳极化，对其力学性能影响不大，但能减缓结构钢及铝合金与其接触的腐蚀速度。

1.3 相变及显微组织

1）相变

① 相变温度　α+β↔β转变温度为730~750℃。

② 时间-温度-组织转变曲线见图7.4-1。

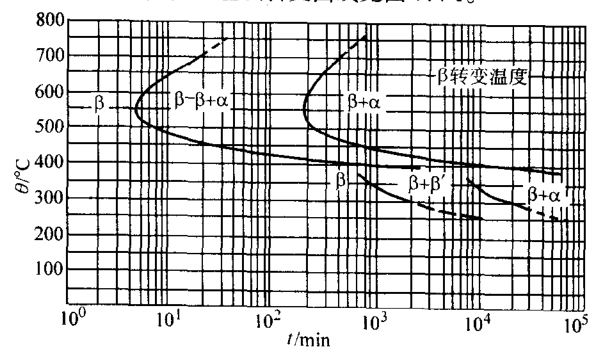


图7.4-1 TB2合金从β相区淬火后的时间-温度-组织转变图（T-T-T图）

③ 合金的相分离反应　该合金在β相区固溶处理水淬或空冷后均可将体心立方结构β相保留至室温。亚稳定β相在低温350℃时效25 h发生相分离反应，即β+β′，其中β′为贫β稳定元素的β相。350℃时效150 h后β′→β+α，β′相中析出弥散α相，随时效时间延长，α相逐渐长大，即弥散成核长大。亚稳定β相在300℃时效150h发生相分离反应，且出现的数量少，但弥散度大。

2）合金组织结构　合金在β相区固溶处理水淬或空冷后为单一的体心立方结构。退火炉冷或缓冷后的组织为β相和少量的α相。固溶时效后的组织由β相和α相组成。

1.4 力学性能

1）技术标准规定的性能见表7.4-6。

2）加工材时效后的力学性能见表7.4-7。

3）板材的力学性能

① 板材的力学性能见表7.4-8。

② 板材的焊接接头及母材的力学性能见表7.4-9。

③ 板材的弯曲性能见表7.4-10。

4）箔材的力学性能见表7.4-11。

5）丝材的力学性能

① 室温拉伸性能见表7.4-12。

② 各种温度下的拉伸性能见表7.4-13。

③ 扭转与剪切性能。

表 7.4-6　TB2 钛合金技术标准规定的性能

技术标准	品种	δ 或 d/mm	状态	取样方向	室温				
					σ_b/MPa	δ_5/ %	ψ/%	α/ (°)	τ/MPa
GB/T 3621—1994	板材	1.0 ~ 3.5	固溶处理	LT	≤980	≥20	—	≥120	—
			固溶时效		≥1 320	≥8	—	—	—
K/JC 2—1984	带材	1.0 ~ 1.5	固溶处理	L	≤980	≥20	—	≥120	—
			固溶时效		≥1 080	≥10	—	—	—
GJB 2219—1994	棒（线）材	2.5 ~ 10.0	固溶处理	L	885 ~ 980	≥20	≥60	—	≥640
			固溶时效		≥1 100	≥12	≥30	—	≥700

注：1.GJB 2219—1994 规定，直径小于 7 mm 棒（线）材的 δ_5 和 ψ 值报实测数据。

2. GJB 2219—1994 规定，固溶处理状态的棒线材应进行冷顶锻试验，当锻后高度与锻前高度之比为 1:3 时，棒线材圆周表面应无裂纹。

表 7.4-7　TB2 钛合金加工时效性能

加工材	规格/mm	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%
板材	1 ~ 3	≥1 325	≥8.0	—
带材	1.0 ~ 1.5	≥1 240	≥15.0	—
箔材	0.25	≥1 260	≥8.0	—
轧棒	ϕ12	≥1 390	≥11.0	≥36.0
锻棒	ϕ15	≥1 510	≥7.5	≥34.5
丝材	ϕ5.2	≥1 685	≥12.0	≥45.5
锻件	ϕ250 × 50	≥1 225	≥9.0	≥15.0

表 7.4-8　TB2 钛合金板材力学性能

热处理	1.0 mm		1.7 mm		2.3 mm		3.6 mm	
	σ_b/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	δ_5/%
固溶	902	24.5	902	27.0	937.5	20.5	912	20.0
固溶时效	1 363	12.5	1 358	11.0	1 358	11.0	1 344	8.5

表 7.4-9　TB2 钛合金板材及焊接接头力学性能

状态	母材		焊接接头		
	σ_b/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	δ_5/%	α/ (°)
固溶或焊态	931.5	20.0	931.5	18.0	120
固溶 + 一次时效	1 324.0	8.0	1 294.5	5.0	0.0
固溶 + 二次时效	1 177	12.0	1 128	11.0	29.5 ~ 54.5

表 7.4-10　TB2 钛合金板材弯曲性能

品种	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	α（D = 3δ）/ (°)
板材	1.0 ~ 3.5	固溶处理	LT	20	≥120

表 7.4-11　TB2 钛合金箔材的力学性能

热处理	0.40 mm × 250 mm		0.25 mm × 300 mm	
	σ_b/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	δ_5/%
退火(800℃,30 min,FC)	918	25.5	865	28.0
退火 + 500℃，4 h	905	17.0	988	16.0

续表 7.4-11

热处理	0.40 mm × 250 mm		0.25 mm × 300 mm	
	σ_b/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	δ_5/%
退火 + 500℃，8 h	1 028	10.5	1 269	8.5
退火 + 500℃，16 h	1 182	10.0	1 265	3.5

表 7.4-12　TB2 钛合金丝材拉伸性能

品种	d/mm	状态	σ_b/MPa	ψ/%
丝材	4.0	750℃, 10 s, AC	912	72
		800℃, 10 s, AC	912	71
		800℃, 50 s, AC	961	68

表 7.4-13　TB2 钛合金各种温度下的拉伸性能

品种	d/mm	状态	θ/ ℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$	δ_5/%	ψ/ %
丝材	4.0	800℃, 50 s, 空冷	20	961	—	—	68
			200	922	—	—	67
			250	902	—	—	65
			300	888	—	—	70
			400	873	—	—	73
			500	726	—	—	90
棒材	10	固溶时效	20	1 137	1 061	18.0	50.5
			200	1 060	956	19.0	55.0
			250	996	867	17.5	54.5
			300	954	819	16.0	53.0
			400	895	771	17.0	63.0
			500	814	731	18.0	75.0

（Ⅰ）室温剪切性能见表 7.4-14。

表 7.4-14　TB2 钛合金室温剪切性能

品　种	d/mm	状　态	τ/MPa
丝　材	4.0	750，10 min，空冷	657
		800，10 min，空冷	662
		800，50 s，空冷	667

（Ⅱ）各种温度下的剪切性能见表 7.4-15。

表 7.4-15 TB2 钛合金各种温度下的剪切性能

品种	d/mm	状态	τ/ MPa						
			20℃	100℃	200℃	250℃	300℃	400℃	500℃
丝材	4.0	固溶	667	—	623	608	603	598	—
棒材	10.0	固溶时效	750	689	664	—	665	609	583

6）热稳定性

① 板材试样热暴露后的室温拉伸性能见表 7.4-16。

表 7.4-16 TB2 钛合金板材热稳定性

品种	δ/mm	状态	取样方向	热暴露		σ_b/MPa	δ_5/%
				θ/℃	t/ h		
板材	2.0	800℃,30 min,水淬 + 480℃,16 h,空冷	LT	未暴露		1 530	7.5
				350	50	1 548	8.5
					100	1 550	7.0

② 棒（丝）材试样热暴露后的拉伸和剪切性能见表 7.4-17。

表 7.4-17 TB2 钛合金棒（丝）材热稳定性能

品种	d/mm	状态	热暴露		20					200		
			θ/℃	T/h	σ_b	$\sigma_{p0.2}$	δ_5	ψ	τ/MPa	σ_b/MPa	ψ/%	τ/MPa
					MPa		%					
丝材	4.0	固溶	未暴露		961	—	—	68.0	667	922	67.0	623
			200	200	981	—	—	66.0	677	907	68.5	618
			300	200	991	—	—	64.0	677	892	67.5	623
棒材	10.0	固溶时效	未暴露		1 137	1 061	18.0	50.5	750	—	—	664
			300	500	1 159	1 069	17.5	44.5	747	—	—	669
			400	200	1 168	1 077	15.5	40.5	745	—	—	680
			450	50	1 140	1 067	16.0	45.5	742	—	—	—

品种	d/mm	状态	热暴露		300					400		
			θ/℃	t/h	σ_b	$\sigma_{p0.2}$	δ_5	ψ	τ/MPa	σ_b/MPa	ψ/%	τ/MPa
					MPa		%					
丝材	4.0	固溶	未暴露		888	—	—	70.0	603	873	73.0	598
			200	200	897	—	—	69.0	598	873	74.0	593
			300	200	892	—	—	68.5	608	873	71.5	608
棒材	10	固溶时效	未暴露		954	819	16.0	53.0	665	—	—	609
			300	500	968	814	14.0	53.0	633	—	—	—
			400	200	968	811	14.0	47.5	638	—	—	619
			450	50	—	—	—	—	—	—	—	—

7）持久和蠕变性能

① 高温持久性能见表 7.4-18。

表 7.4-18 TB2 钛合金持久性能

品 种	δ/mm	状 态	取样方向	θ/℃	σ_{100}/MPa
板材	2.0	800，30 min，水淬 + 480℃，16 h,空冷	LT	350	1 060

② 高温蠕变性能见表 7.4-19 。

表 7.4-19 TB2 钛合金蠕变性能

品种	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	$\sigma_{0.2/100}$/MPa
板材	2.0	800℃，30 min，水淬 + 480℃，16 h，空冷	LT	350	490

8）疲劳性能

室温应力控制低周疲劳性能见表 7.4-20。

表 7.4-20 TB2 钛合金低周疲劳性能

品种	d/mm	状态	K_t	R	f/Hz	K	σ_{max}/MPa	N/周
棒材	13	固溶时效	2.5	0.1	0.17	0.6	877	3 426
						0.5	731	9 707
						0.45	658	23 567

9）弹性性能

① 弹性模量见表 7.4-21 。

表 7.4-21 TB2 钛合金弹性模量

品种	d/mm	状 态	E/GPa							
			20℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃
丝材	4.0	固溶	85	84	83	82	79	75	70	—
棒材	10.0	固溶时效	110	108	104	100	96	92	86	77

② 切变模量见表 7.4-22。

表 7.4-22 TB2 钛合金切变模量

品种	d/mm	状态	G_D/GPa							
			20℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃
丝材	4.0	固溶	32	32	31	31	30	29	27	—
棒材	10	固溶时效	41	40	39	37	36	34	32	29

10）泊松比见表 7.4-23。

表 7.4-23 TB2 钛合金泊松比

品种	d/mm	状态	μ							
			20℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃
丝材	4.0	固溶	0.33	0.33	0.32	0.31	0.29	0.27	0.27	—
棒材	10	固溶时效	0.34	0.34	0.33	0.32	0.32	0.34	0.35	0.29

11）锻件及厚板的性能

① 壳体用锻件的性能见表 7.4-24。

表 7.4-24 TB2 钛合金锻件性能

规格/mm	热处理制度	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
$\phi150\times70$	700℃，1 h，空冷 +500℃，8 h	1 270	1 205	12.5	42.5
	700℃，1 h，空冷 + 500℃，8 h + 620℃，30 min，空冷	1 108	1 045	14.0	36.0

续表 7.4-24

规格/mm	热处理制度	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
ϕ250×50	700℃，1 h，空冷+530℃，1 h，空冷+500℃，8 h+620℃，30 min，空冷	1 237	1 175	9.0	18.0

② 甩平头用锻件（ϕ170 mm×75 mm）的性能见表7.4-25。

表 7.4-25 TB2 钛合金用平头锻件性能

热处理制度	取样方向	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%
锻态+550℃时效	径向	1 327	9.0	18.5
	轴向	1 377	5.6	15.5

③ 超速离心机用角转头锻件的性能见表7.4-26。

表 7.4-26 TB2 钛合金角转头锻件性能

规格/mm	取样方向	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$	σ_{bH}/MPa	σ_{bH}/σ_b
ϕ195×150	径向	1 254	1 186	5.5	10.5	57.0	1 866	1.49
	轴向	1 241	1 170	6.0	11.0	—	—	—

④ 厚板的性能见表7.4-27。

表 7.4-27 TB2 钛合金厚板性能

规格/mm	热处理制度	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
25×1 000×2 000	700℃，1 h，空冷+500℃，8 h+620℃，30 min，空冷	1 248	1 173	7.0	19.0
50×500×1 000		1 206	1 174	12.5	26.5

12）大口径薄壁旋压管材　冷旋压无缝管材有ϕ95 mm×2 mm、ϕ200 mm×2 mm、ϕ286 mm×2 mm三种规格，ϕ286 mm×2 mm的管材性能，见表7.4-28。

表 7.4-28 TB2 钛合金大口径薄壁旋压管材性能

固溶温度/℃	700		750		800	
性　能	σ_b/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	δ_5/%
固溶状态	961	17.5	917	18.5	897	17.0
随炉升温+500℃，8 h	1 326	8.5	1 376	7.5	1 387	7.0
随炉升温+620℃，30 min	1 131	13.0	1 159	13.0	1 145	11.0
500℃，8 h	1 324	8.0	1 317	8.0	1 339	8.0
500℃，8 h+620℃，30 min	1 141	12.0	1 170	12.0	1 136	12.0

13）轧环及锻环　热轧环有ϕ1 540 mm/ϕ1 480 mm×240 mm、ϕ328 mm/ϕ267 mm×200 mm、ϕ299 mm/ϕ251 mm×70 mm和ϕ299 mm/ϕ260 mm×52 mm等规格。还生产过ϕ415 mm/ϕ280 mm×80 mm和ϕ230 mm/ϕ110 mm×185 mm锻造环。ϕ299 mm/ϕ251 mm×70 mm热轧环的性能，见表7.4-29。

表 7.4-29 TB2 钛合金热轧环性能

热处理	取样	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%
700℃，30 min，空冷	轴向	968	16.5	30.5
700℃，30 min，空冷+500℃，8 h+620℃，30 min，空冷	轴向	1 172	11.5	17.5
800℃，30 min，空冷	轴向	986	15.5	36.0
800℃，30 min，空冷+500℃，8 h+620℃，30 min，空冷	轴向	1 198	9.0	21.5

1.5 制造工艺和性能

1）熔炼 TB2合金熔炼，采用两次或三次真空自耗熔炼。

2）锻造 TB2合金锻造，在蒸汽锤或水压机上，采用β相区锻造。

3）成形性能

① 板材的冷成形性能见表7.4-30。

表 7.4-30 TB2 钛合金板材的冷成形性能

品种	δ/mm	状态	θ/℃	杯突值/mm
板材	1.5	800℃，30 min，空冷	20	7.0

② 板材的超塑性能　该合金吹塑成型温度为750℃。利用低的吹塑成型温度可制成复杂曲面的波纹壳体和蜂窝结构等。

③ 冷镦比 D_f/D_0 = 2.2。

④ 镦、铆性能　TB2合金丝材能冷镦成各种头型铆钉，并能冷铆和热铆。棒材能冷镦成各种头型螺栓等紧固件，并可热处理强化。

4）焊接性能该合金具有良好的焊接性能，其组合件可用氩弧焊和等离子焊等方法焊接。

5）淬透性　TB2合金淬透性，沿150 mm厚度方向上，按横向截取三组试样，数据的平均值见表7.4-31，数据表明TB2合金的淬透性至少150 mm。

表 7.4-31 TB2 钛合金淬透性性能

部位	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%
边部	1 164	6.0	12.0
心部	1 173	8.5	17.0
边部	1 180	7.0	17.0

6）热处理制度　按GJB 3763—1999《钛及钛合金热处理规范》的规定。

① 固溶处理　在750~800℃范围内选定固溶处理温度，通常的固溶处理制度是800℃±10℃，3~30 min，空冷或更快冷。

② 时效　在450~550℃范围内选定时效温度，通常的时效制度是500℃±10℃、8~24h，空冷或炉冷。

③ 零件热处理工艺　成品零件应采用只能真空等无氧化热处理。固溶处理和时效的温度及时间参数，根据性能要求确定。

表面处理工艺丝材和棒材在冷镦成形前，表面要经过专门的硼化处理，使其生成极薄的化学涂层，作为冷镦时的润滑载体。硼化处理用的溶液配方如下：

氟硼酸钾	0.8 kg
氯化钡	0.8 kg
硝酸铵	0.4 kg
水	10 kg

1.6 选材及应用

1）星箭连接带

① 星箭连接带的选材标准　星箭连接带在周向实现和运载火箭的连接，按设计要求，合金材料要有优异的工艺成型性能，且有较高的强度和良好的焊接性能。

② 选材　TB2是亚稳定β型钛合金，在固溶处理状态下，合金材料冷加工和冷成型性能好，时效强度高，比强度高，该合金是星箭连接带的理想材料。

③ TB2合金带材研制

（Ⅰ）星箭连接带的规格和技术指标

规格：1.2 mm×（90～100）mm×2 000 mm，见图7.4-2；

技术指标：室温拉伸性能 $\sigma_b \geq 981$ MPa，$\delta_5 \geq 10\%$；

室温下加载785 MPa，放置100 h不发生断裂；

测定弹性模量、线胀系数、+100℃及-60℃的拉伸性能；

合金要有良好的冷弯性能。



图7.4-2　TB2合金星箭连接带

（Ⅱ）星箭连接带的性能　星箭连接带为航天部专用产品，先后向该部提供了四批1.2 mm×（90～100）mm×2 000 mm带材，其性能见表7.4-32。

表7.4-32　TB2钛合金星箭连接带性能

状态	1978		1979		1980		1982	
	σ_b/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	δ_5/%
室温								
固溶	828.5	32.5	887.5	24.0	849.0	31.0	918.0	28.0
	843.0	30.0	863.0	20.0	857.0	31.0	900.0	30.0
时效	1 187	16.5	1 187	16.0	1 203	12.5	1 238	15.5
	1 192	16.0	1 167	14.0	1 222	13.0	1 262	17.5
	1 201	17.0	1 167	16.5	1 219	14.0	1 261	15.0
-60℃								
时效	1 432	4.5	1 422	4.5	1 510	4.0	1 385	6.5
	1 461	5.5	1 471	5.0	1 448	4.5	1 397	6.0
	1 451	4.5	1 451	5.0	1 459	5.0	1 422	6.0
	—	—	1 393	4.5	—	—	—	—

TB2合金带材的性能完全满足设计要求，批次间性能稳定。采用时效热校形的方法最终成形出星箭连接带的耳型部分，校型后的耳型部分符合设计图样要求。

④ 功能考核试验　TB2合金带材通过耳型成型、点焊、时效后性能稳定，符合设计要求；制成连接包带后经强度试验、低温真空试验，能正常工作和解锁；连接包带在经受结构静力试验、振动试验和噪音试验后，仍能正常工作。1984年TB2钛合金包带在“331”通信卫星上首次正式使用。TB2星箭连接带，已在气象星、亚洲一号、亚太一号、资源一号等星的发射上成功使用。TB2合金包带已在各种型号的卫星上使用了二十多次。在2000年9月1日我国资源二号卫星发射成功，使用了三条1.5 mm厚的TB2包带。至今仍继续使用。

2）钛合金铆钉

① 钛合金铆钉丝的选材标准　钛合金铆钉用于超音速飞机，要求材料具有良好的冷成形性能，有高强度和较高的剪切强度，300℃有良好的热稳定性。

② 选材　TB2属于亚稳定β型高强度钛合金，该合金的优点是：冷成形性能好，时效强度和断裂韧度高，淬透深度大，耐蚀性好等，能满足航空铆钉的使用要求。

③ 钛合金铆钉丝的研制

钛合金铆钉丝的规格和技术指标：

规格：$\phi 3.5_{-0.06}^{0}$ mm，$\phi 4.0_{-0.08}^{0}$ mm

技术指标：$\sigma_b \geq 882.5$ MPa，$\delta_5 \geq 20\%$，$\psi \geq 45\%$

$\tau \geq 588.0$ MPa

300℃热稳定100 h后300℃　$\tau \geq 392.0$ MPa

形状：平锥头铆钉按GB/T 868—1986；半圆头铆钉按GB/T 867—1986；120沉头铆钉按GB/T 954—1986

公差与质量：$\phi 3.5_{-0.06}^{0}$、$\phi 4.0_{-0.08}^{0}$ mm丝材均匀不得超过负公差之半；表面不允许有压坑、折迭、氧化皮等缺陷。

工艺性能：丝材能冷镦，铆钉能冷铆。

盘条直径：≥700 mm

④ 铆钉丝材的性能

（Ⅰ）铆钉丝材的冷镦性能为考核合金冷镦和冷铆的可能性，首先用静压法测定了固溶处理和过时效状态下的 D_1/D_0 值，见表7.4-33（试样尺寸为 ϕ4 mm×8 mm）。根据飞机用铆钉丁头尺寸的计算和资料的数据，一般认为 $D_1/D_0 \geq 2.0$，即可冷镦成铆钉，$D_f/D_0 \geq 1.6$ 即可进行冷铆。

表7.4-33　TB2钛合金铆钉丝材的冷镦性能

直径 d/mm	热处理制度	D_f/D_0
4.0	800℃固溶，空冷	2.2
	800℃固溶，空冷+660℃，8 h，空冷	1.6

（Ⅱ）铆钉丝材固溶处理状态的性能见表7.4-34 。

表7.4-34　TB2钛合金铆钉丝材固溶性能

直径 d/mm	θ/℃	σ_b/MPa	ψ/%	τ_{cp}/MPa
4.0	20	961.0	68.0	68.0
	200	921.5	67.0	63.5
	250	902.0	65.0	62.0
	300	887.5	70.0	61.5
	400	872.5	73.0	61.0
	500	725.5	90.0	—

（Ⅲ）铆钉丝材固溶处理后200、250、300℃热暴露后的性能见表7.4-35 。

表7.4-35　TB2钛合金热稳定性能

热暴露	200℃/150 h			200℃/200 h		
θ/℃	σ_b/MPa	ψ/%	τ_{cp}/MPa	σ_b/MPa	ψ/%	τ/MPa
20	1 000	65.0	676.5	1 009.5	66.0	69.0
200	902.0	67.0	627.5	907.0	68.5	63.0
250	902.0	67.0	617.5	912.0	66.0	62.5

续表 7.4-35

热暴露	200℃/150 h			200℃/200 h		
θ/℃	σ_b/MPa	ψ/%	τ_{cp}/MPa	σ_b/MPa	ψ/%	τ/MPa
300	882.5	69.5	608.0	897.0	69.0	61.0
400	872.5	75.5	598.0	872.5	74.0	60.5
热暴露	250℃/150 h			250℃/200 h		
20	912.0	68.0	666.5	990.5	64.0	676.5
200	912.0	65.0	617.5	892.0	67.5	622.5
250	902.0	68.0	613.0	912.0	68.0	613.0
300	882.5	69.0	657.0	892.0	68.5	608.0
400	863.0	73.5	593.0	827.5	71.5	608.0
热暴露	300℃/150 h			300℃/200 h		
20	970.5	68.0	666.5	990.5	64.0	676.5
200	912.0	65.0	65.0	892.0	67.5	622.5
250	902.0	68.0	613.0	912.0	68.0	613.0
300	882.5	69.0	657.0	892.0	68.5	608.0
400	863.0	73.5	593.0	827.5	71.5	608.0

表 7.4-33～表 7.4-35 中的数据表明，TB2 合金丝材的工艺性能和力学性能满足航空铆钉的使用要求，说明选材是合理的。

⑤ 功能考核试验　TB2 钛合金铆钉通过各种试验，满足航空铆钉的使用要求，TB2 合金铆钉丝，1979 年 10 月 29 日通过部级鉴定后，TB2 钛合金铆钉分别应用于不同歼击飞机上，至今仍继续使用。

（Ⅰ）铆钉铆接后的拉伸破坏载荷见表 7.4-36。

表 7.4-36　TB2 钛合金铆钉铆接后的拉伸破坏载荷

品种	d/mm	状态	铆接方法	拉伸破坏载荷/kN					
				20℃	100℃	200℃	250℃	300℃	350℃
100°埋头铆钉	4.0	固溶+冷镦	手工冷铆	1 048	899	878	865	818	830
			冷压铆	1 069	902	855	835	824	824
			热铆	925	815	720	697	696	696

（Ⅱ）铆钉铆接后的拉伸强度见表 7.4-37。

表 7.4-37　TB2 钛合金铆钉铆接后的拉伸强度

品种	d/mm	状态	铆接方法	σ_b/MPa					
				20℃	100℃	200℃	250℃	300℃	350℃
平锥头铆钉	4.0	固溶+冷镦	手工冷铆	1 048	899	878	865	818	830
			冷压铆	1 069	902	855	835	824	824
			热铆	925	815	720	697	696	696

（Ⅲ）铆钉铆接后的抗剪强度见表 7.4-38。

表 7.4-38　TB2 钛合金铆钉铆接后的抗剪强度

品种	d/mm	状态	铆接方法	τ/MPa					
				20℃	100℃	200℃	250℃	300℃	350℃
平锥头铆钉	4.0	固溶+冷铆	手工冷铆	716	626	607	583	575	522
			冷压铆	719	648	606	597	554	546
			热铆	663	589	547	548	496	501

（Ⅳ）铆钉铆接后再经热暴露的室温拉伸和剪切性能见表 7.4-39。

表 7.4-39　TB2 钛合金铆钉铆接后再热暴露的性能

品种	d/mm	状态	铆接方法	热暴露		σ_b/MPa	ψ/%	τ/MPa
				θ/℃	t/h			
铆钉	4.0	固溶+冷镦	冷压铆	未暴露		1 023	63.5	674
				285	150	1 063	59.5	703

3）固体火箭发动机壳体

① 选材　TB2 合金属于亚稳定β型钛合金，它具有冷成形性能好，时效强度和断裂韧性高，淬透深度大，焊接性能和耐蚀性好等优点。它适用于要求冷成形、强度高、焊接组装的结构件，TB2 合金是制作固体发动机壳体的理想材料。

② 壳体的规格尺寸和技术指标

固体火箭发动机壳体的尺寸和技术指标

壳体尺寸：ϕ286 mm×1 430 mm（壁厚 2.0 mm）

技术指标：

板材：$\sigma_b \geqslant$ 1 079 MPa　　$\delta_5 \geqslant 8.0\%$

焊接：$\sigma_b \geqslant$ 1 030 MPa　　$\delta_5 \geqslant 5.0\%$

锻件：$\sigma \geqslant$ 1 079 MPa　　$\sigma_{0.2} \geqslant$ 1 015 MPa

$\delta_5 \geqslant 8.0\%$　　$\psi \geqslant 20.0\%$

TB2 合金壳体的制作工艺　采用冷冲压封头、筒体滚弯成形、法兰－封头－筒体组合焊接工艺和整体热处理工艺制作。

③ TB2 合金壳体的性能

（Ⅰ）TB2 合金板材的性能见表 7.4-40。

表 7.4-40　TB2 钛合金板材性能

状　态	纵　向		横　向	
	σ_b/MPa	δ_5%	σ_b/MPa	δ_5/%
固溶（800℃/30 min、水淬）	828.0	23.0	951.0	22.0
固溶＋500℃/8 h、空冷	1 360	10.0	1 397	6.5
固溶＋500℃/8 h＋620℃/30 min、空冷	1 188	14.5	1 163	16.0

（Ⅱ）TB2 合金板材的焊接性能见表 7.4-41。

表 7.4-41　TB2 钛合金板材的焊接性能

焊接方法	氩弧焊		等离子焊	
性能	σ_b/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	δ_5/%
	1 079～1 135	11.0～12.5	1 040～1 084	13.0～17.0

（Ⅲ）TB2 合金锻件的性能见表 7.4-42。

表 7.4-42 TB2 钛合金锻件性能

规格/mm	热处理	σ_b/MPa	δ_5%	ψ/%
ϕ150×70	700℃，1 h，空冷+500℃，8 h，空冷	1 204	12.0	29.0
	700℃，1 h，空冷+500℃，8 h+620℃，30 min、空冷	1 106	14.0	33.0
ϕ250×50	700℃，1 h，空冷+500℃，8 h+620℃，30 min，空冷	1 202	11.5	25.0

（Ⅳ）TB2合金发动机壳体试验结果见表7.4-43。

表 7.4-43 TB2 钛合金发动机壳体试验结果

协议技术指标	实际达到的技术指标
水压试验，爆破压力	
12.3 MPa	13.7 MPa
地面热试车	
—	压力 P_{max} = 9.1 MPa，完全正常，各种参数均满足设计指标

（Ⅴ）功能考核试验 TB2钛合金固体发动机壳体通过了水压试验和装药点火热试车试验，满足设计指标要求。

4）卫星波纹壳体

① 卫星波纹壳体的选材标准 卫星波纹壳体要求材料有优异的成型性能，还要有高的强度和刚度。

② 选材 TB2合金，在β相区固溶处理状态下有优异的冷加工和冷成型性能，且时效强度和断裂韧度高，超塑性温度低等优点，TB2合金箔材是卫星波纹壳体的较理想材料。

③ 卫星波纹壳体技术指标

合金箔材技术指标：

规格：(0.25 mm±0.05 mm)×(250～300) mm

技术指标：1 固溶状态：$\sigma_b \geq$ 834.0 MPa，$\delta_{50} \geq$ 16.0 %；

2 实测：冷轧态固溶态（横向）的 σ_b、δ、E；

壳体技术指标：集中力承载 80 kN，均布力承载 210 kN;

TB2钛合金壳体，见图7.4-3。

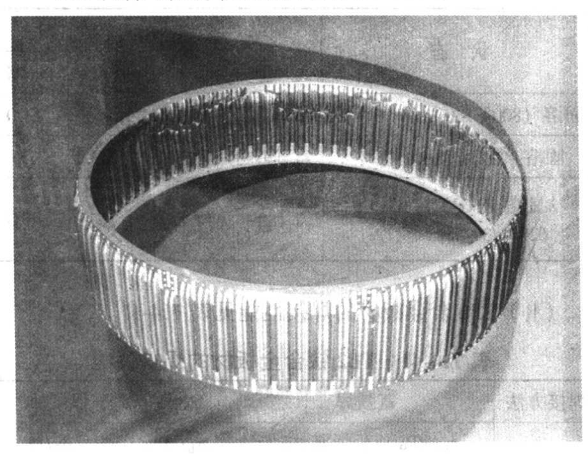


图 7.4-3 TB2 钛合金卫星波纹壳体

④ 卫星波纹壳体试验结果

（Ⅰ）TB2钛合金 0.25 mm×300 mm 箔材性能见表7.4-44和表7.4-45。

表 7.4-44 TB2 钛合金 0.25×300×Lmm 箔材性能

技术标准			实测性能		
厚度公差±0.05	σ_b/MPa	δ_{50}/%	厚度公差±0.02	σ_b/MPa	δ_{50}/%
冷轧态	实 测		冷轧态	1 180～1 331	—
固溶处理、炉冷	833.5	16.0	固溶处理、炉冷	887.5～914	16.0～21.5

表 7.4-45 TB2 钛合金 0.25 mm×300 mm 箔材性能

状态	试样方向	σ_b/MPa	δ_{50}/%	E/GPa
冷轧态（加工率64%）	横向	1 265	2.0	93
	纵向	1 249	3.0	85
固溶、炉冷（加工率50%）	横向	872	23.0	80
	纵向	841	17.5	79

（Ⅱ）卫星波纹壳体的性能见表7.4-46和表7.4-47。

表 7.4-46 TB2 钛合金卫星波纹板吹塑成形态的性能

状态	试样	σ_b/MPa	δ_{50}/%	E/GPa
吹塑成形态	纵向	1 128	14.0	108
	纵向	1 062	17.0	108
	横向	1 066	11.0	118

表 7.4-47 TB2 钛合金卫星波纹壳体的性能

协议技术指标			实际达到的技术指标		
壳体 δ/mm	集中力承载/kN	均布力承载/kN	壳体 δ/mm	集中力承载/kN	均布力承载/kN
吹塑成型态，0.25 mm	80	—	0.25	96	210
0.5 mm厚 TA3壳体	—	210	0.50	—	380

（Ⅲ）功能考核试验 TB2合金箔材性能满足协议指标要求，TB2波纹壳体通过了模态试验，集中力、均布力、静力轴压试验，集中力使用载荷80 kN，实际达到96 kN。与在通信卫星上发射成功的TA3波纹壳体相比，TB2合金壳体壁厚减半后，其承载力一样。等壁厚的TB2合金波纹壳体的承载力是TA3波纹壳体的1.75倍。达到了预定结果，完成了地面试验。

5）钛多层壁防热瓦

① 钛多层壁防热瓦的技术指标

TB2钛合金箔材研制：规格（0.1、0.08、0.04 mm×250 mm（$L \geq$1 500 mm）

TB2钛合金双向正波纹板研制：规格 200 mm×200 mm×5 mm

TB2钛合金多层壁防热瓦技术指标：

规格：200 mm×200 mm×18.5 mm

多层壁结构的容重：0.17 g/cm^3

结构性能：

（Ⅰ）平拉试验 平均破坏应力为 286.1 kPa（Rohr公司为 127.6 kPa）;

（Ⅱ）石英灯隔热试验 热流密度 41.868 W/m²，加热 12 min，背温为 152℃（美国规定为 177℃）；

（Ⅲ）热真空试验 真空度 1.7×10^{-3} Pa，热流 93.2 kW/m²，加热时间 15 min 时，表面温度为 575℃，内部温度 446℃，背温 367.2℃；

（Ⅳ）热交变试验 加热至 500℃，交变 30 周期无损伤；

（Ⅴ）噪声振动试验 155 dB 噪声下进行相当于 25 次飞行条件的试验，试样完好；

（Ⅵ）表观热导率 热面温度为 500℃时为 0.075 W/（m·K）。

② TB2 钛合金多层壁防热瓦的结构性能

（Ⅰ）平拉试验结果见表 7.4-48。

表 7.4-48 TB2 钛合金多层壁防热瓦的平拉性能

性 能	破坏载荷/N	破坏应力/kPa	破坏位置
1	628	251.2	盖板/波纹板间
2	963	385.2	4/5 层间
3	626.4	250.6	盖板/波纹板间
4	754.2	298.1	胶合处裂开
5	613.2	245.3	2/3/4 层间
平均值	715.2	286.1	—
Rohr. In. 的平均值	326	127.6	—

（Ⅱ）TB2 合金 0.1 mm 厚箔材拉伸性能见表 7.4-49。

表 7.4-49 TB2 钛合金 0.1 mm 箔材性能

状态	σ_bN/mm	δ_{50}/%	备注
冷轧态	865	—	断外
	1 090	—	断外
	895	—	断外
	1 010	—	断外
800℃/30 min，炉冷	905	9.0	
	840	5.5	
	910	7.0	
	850	8.0	
冷轧＋焊接热循环	720	3.0	
	795	2.5	
	800	3.5	
	810	2.0	
	805	3.0	

（Ⅲ）四点弯曲试验结果见表 7.4-50。

表 7.4-50 TB2 钛合金多层壁防热瓦四点弯曲性能

加载增量级数	总载荷 P/N	总位移 Δ/mm
1	86.5	0.126
2	116.5	0.182
3	152.5	0.266
4	251.5	0.265
5	340.0	0.266
6	364.0	0.272

续表 7.4-50

加载增量级数	总载荷 P/N	总位移 Δ/mm
7	444.5	0.272
8	495.0	0.275
9	575.0	0.272
10	585.0	0.270

（Ⅳ）表观热导率见表 7.4-51。

表 7.4-51 TB2 钛合金多层壁防热瓦表观热导率

热面温度/℃	冷面温度/℃	平均温度/℃	热导率/W·m^{-1}·K^{-1}
299	71	185	0.053
400	100	250	0.063
500	139	319.5	0.075
600	179	389.5	0.086
700	232	466	0.114

（Ⅴ）综合性能试验 采用五块 100 mm×100 mm×18.5 mm 的方形样品，及一块 ϕ169 mm×18.5 mm 的圆形样品进行了综合性能试验，模拟航天飞机再入重复使用 30 次。进行了石英灯隔热试验、热真空试验、热交变试验和噪声振动试验，并检测了表观热导率。其性能均达到了技术指标的要求。

（Ⅵ）功能考核试验 液相界面扩散焊（LID）工艺制作的 TB2 钛合金多层壁防热瓦，经航天部 703 所综合性能测试，该多层壁防热瓦的性能达到了技术指标要求。

6）复合材料用 TB2 合金箔材 TB2 合金箔材嵌入碳钎维板中，拉脱试验结果列于表 7.4-52。数据表明，不嵌入 TB2 合金箔材的碳板，其抗剪强度只有 87.0 MPa，而用四层 0.15 mmTB2 合金箔材强化的铺层，剪切强度提高到 147.5 MPa，提高了 69.5%；用两层 0.15 mm，一层 0.3 mm 的 TB2 合金箔材强化后的铺层，抗剪强度为 151.0 MPa，提高了 74.0%。

表 7.4-52 TB2 钛合金箔材嵌入碳钎维板后拉脱性能

嵌入方式	平均 τ/MPa	增强效益/%
原铺层（未嵌入）	87.0	0
嵌入四层 0.15 mmTB2	147.5	69.5
嵌入二层 0.15 mm 及一层 0.3 mmTB2 合金箔材	151.0	74.0

2 TB3 钛合金

TB3 合金是一种可热处理强化的亚稳定β型钛合金。含有同晶型β稳定元素 Mo 10%，V 8%，共析型β稳定元素 Fe1%，α稳定元素 Al 3.3%，钼当量 14.9%。该合金的主要特点是在固溶处理状态具有优异的冷成型性能。在固溶时效状态强度与断裂韧度的匹配较好。同α－β型合金相比，该合金的密度较高和抗高温蠕变能力较低。

该合金适合于制造航空航天紧固件。铆钉是在固溶处理状态下使用，长期工作温度为 200℃以下，螺栓则在固溶时效状态下使用，长期工作温度为 300℃以下，短时工作温度可达 500℃。

2.1 化学成分

GB/T 3520.1—1994《钛及钛合金牌号和化学成分》、

GJB 2219—1994《紧固件用钛及钛合金棒（线）材规范》、HB6732—1993《航空紧固件用 TB3 钛合金棒（线）材》和 Q/XB1509—1996《TB3 钛合金棒材》规定的化学成分见表 7.4-53。

表 7.4-53　TB3 钛合金化学成分（质量分数）%

合金元素					杂质≤					
Mo	V	Fe	Al	Ti	C	N	H	O	其他元素[③] 单个	其他元素[③] 总和
9.5～11.0[①]	7.5～8.5	0.8～1.2	2.7～3.7[②]	余量	0.05	0.04	0.015	0.15[②]	0.10	0.40

注：HB6732—1993 规定 Si≤0.10%

① HB6732—1993 规定 Mo＝9.5%～10.5%。

② GJB2219—1994 和 HB6732—1993 规定 Al＝2.9%～3.7%，O≤0.13%。

③ 产品出厂时可不检验其他元素，用户要求并在合同中注明时应予以检验。

2.2　物理及化学性能

1）密度 $\rho=4.84$ g/cm^3。

2）热导率见表 7.4-54

表 7.4-54　TB3 钛合金热导率

θ/℃	100	200	300	400	500	600	700
λ/W·m^{-1}·K^{-1}	11.9	13.6	18.3	23.5	25.5	30.1	35.2

注：经 800℃，30 min，空冷＋550℃，16 h，空冷处理。

3）线胀系数见表 7.4-55。

表 7.4-55　TB3 钛合金线胀系数

θ/℃	20～100	20～200	20～300	20～400	20～500	20～600	20～700	20～800
α/10^{-6}K^{-1}	9.4	9.5	9.5	9.5	9.6	9.7	9.9	10.2

注：经 800℃，30 min，空冷＋550℃，16 h，空冷处理。

4）电阻率　室温电阻率 $\rho=1.6\ \mu\Omega$·m。

5）磁性能　无磁性。

6）抗氧化性能　该合金抗氧化性能和其他钛合金一样，在 800℃下，保持 1 h，表面氧化深度不超过 0.05 mm。

7）耐腐蚀性能　在不同介质中的腐蚀速率见表 7.4-56，不同表面状态的腐蚀速率见表 7.4-57。

表 7.4-56　TB3 钛合金在不同介质中的腐蚀速率

介　质	θ/℃	腐蚀速率/mm·a^{-1}	介　质	θ/℃	腐蚀速率/mm·a^{-1}
10% H_2SO_4	20	0.000 7	70% HNO_3	20	0.06
20% H_2SO_4	20	0.002	饱和 H_2S	20	0.01
40% H_2SO_4	20 50	0.48 2.12	10% HCl	20	0.000 3
60% H_2SO_4	20	1.59	20% HCl	20	0.000 4
20% HNO_3	20	0.02	3.5% NaCl	20	0.000 8

表 7.4-57　TB3 钛合金不同表面状态的腐蚀速率

表面状态	介　质	θ/℃	腐蚀速率/mm·a^{-1}
原始表面[①]	40% H_2SO_4	20 50	0.48 2.12
677℃，加热 1 min，氧化处理	40% H_2SO_4	20 50	0.009 0.74
离子氮化处理	40% H_2SO_4	50	0.01

① 真空固溶处理表面。

2.3　相变及显微组织

1）相变温度　β↔α＋β 转变温度为 750℃±10℃。

2）显微组织　合金在 β 相区固溶处理后空冷或水淬得到单一 β 相。固溶处理加时效（450～650℃）得到 β 相和 α 相。未发现 ω 相或其他脆性相。

3）再结晶温度　在冷变形 40%～50%时，β 相的再结晶开始温度 750℃，结束温度 780℃。

2.4　力学性能

1）技术标准规定的性能见表 5.4-58。

表 5.4-58　技术标准规定的 TB3 钛合金性能

技术标准	品种	d/mm	状态	取样方向	室温 σ_b/MPa	$\sigma_{P0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	τ/MPa	α_{KU}/kJ·m^{-2}	硬度 HRC
GJB2219—1994	棒（线）材	2.5～10	固溶处理 固溶时效	L	840～940 ≥1 100	— ≥1 000	≥15 ≥10	≥60 ≥25	≥650 ≥690	— —	— —
Q/XB1513—1996	棒（线）材	2.5～8.0	固溶处理 固溶时效	L	840～940 ≥1 100	— ≥1 000	≥15 ≥10	≥60 ≥25	≥650 ≥690	— —	— —
Q/XB1511—1996	棒材	16	固溶处理 双重时效 单一时效	L	840～940 ＞1 050 ≥1 100	— — —	≥15 ≥12 ≥10	≥60 ≥25 ≥20	— — —	— ≥250 ≥200	— ≥35 ≥38

注：1. GJB2219—1994 规定，直径小于 7 mm 棒（线）材的 δ_5 和 ψ 值报实测数据。

2. GJB2219—1994 和 HG6732—1993 规定，固溶处理状态的棒（线）材应进行冷顶锻试验，当锻后高度与锻前高度之比为 1:3 时，棒（线）材圆周表面应无裂纹。

2）室温及各种温度下的力学性能

① 硬度　室温硬度见表 5.4-59

表 5.4-59　TB3 钛合金不同热处理状态的室温硬度

品种	d/mm	状　态	硬度 HB	硬度 HRC
棒材	15	800℃，30 min，空冷	269	27
		ST＋500℃，16 h，空冷	395	43
		ST＋550℃，8 h，空冷	353	38

② 拉伸性能

（Ⅰ）不同规格丝材的室温拉伸性能见表 5.4-60。

表 5.4-60　TB3 钛合金不同规格丝材室温拉伸性能

品种	状态	d/mm	取样方向	σ_b/MPa	δ_{10}/%	ψ/%
丝材	800℃，30 min，空冷	2.0	L	877	26.0	71.0
		2.5		878	22.1	74.4
		3.0		880	18.2	74.0
		3.5		866	21.2	76.7
		4.0		876	15.5	74.3
		6.0		876	14.3	74.0

（Ⅱ）各种加工和热处理状态的棒材和板材的室温拉伸性能见表 7.4-61。

表 7.4-61 TB3 钛合金不同加工和热处理状态棒材和板材室温拉伸性能

品种	加工方式	d 或 δ/mm	状态	取样方向	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%
棒材	热轧	15～25	800℃，30 min，水淬	L	907	18.5	62.0
			ST+500℃，16 h，空冷		1 372	9.5	20.5
			ST+550℃，16 h，空冷		1 220	14.0	43.5
	冷变形 50%	15～25	800℃，30 min，水淬	L	919	20.0	71.0
			ST+550℃，16 h，空冷		1 215	13.2	37.5
			550℃，16h，空冷		1 421	11.5	31.7
	锻造	15～25	800℃，30 min，水淬	L	916	17.0	62.0
			ST+500℃，16 h，空冷		1 382	8.0	21.5
			ST+550℃，16 h，空冷		1 230	10.0	32.5
		3～15	700℃，30 min，炉冷到 550℃，16 h，炉冷		1 090	17.5	33.0
板材	冷变形 50%	1.8	800℃，30 min，空冷	LT	883	20.0	—
			ST+500℃，16 h，空冷		1 373	8.0	—
			ST+550℃，16 h，空冷		1 177	10.0	—

（Ⅲ）丝材、棒材在各种温度下的拉伸性能见表 7.4-62。

表 7.4-62 TB3 钛合金丝棒材各种温度下的拉伸性能

品种	d 或 δ/mm	状 态	取样方向	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{P0.2}$/MPa	δ_{10}/%	ψ/%
丝材	4.0	800℃，30 min，空冷	L	20	890	—	19.0	73.0
				100	725	—	17.8	73.6
				200	678	—	14.6	74.9
				250	683	—	12.8	75.1
				300	642	—	19.2	76.9
				350	637	—	18.2	79.3
棒材	7.0	700℃，30 min，炉冷到 550℃，16 h，炉冷	L	-70	1 375		19	39
				20	1 123	1 077	21	48
				150	990	898	22	64
				350	897	787	20	70
				450	787	723	21.3	71.7

③ 冲击性能

（Ⅰ）棒材的室温冲击韧性见表 7.4-63。

表 7.4-63 TB3 钛合金棒材的室温冲击韧性

品种	d/mm	状 态	取样方向	α_{KU}/kJ·m^{-2}
棒材	16	800℃，30 min，水淬	L	777
		ST+500℃，16 h，空冷		517
		ST+550℃，16 h，空冷		596
	25	800℃，30 min，水淬	L	644
		ST+550℃，16 h，空冷		497

（Ⅱ）锻棒各种温度下的冲击韧度见表 7.4-64。

表 7.4-64 TB3 钛合金各种温度下的冲击韧度

品种	d/mm	θ/℃	状态	取样方向	α_{KU}/kJ·m^{-2}
锻棒	20	-70	ST+550℃，16 h，空冷	L	223
			ST+700℃，30 min，炉冷到 550℃，16 h，炉冷		263
		-40	ST+550℃，16 h，空冷	L	183
			ST+700℃，30 min，炉冷到 550℃，16 h，炉冷		270
		20	ST+550℃，16 h，空冷	L	212
			ST+700℃，30 min，炉冷到 550℃，16 h，炉冷		329
		340	ST+550℃，16 h，空冷	L	450
			ST+700℃，30 min，炉冷到 550℃，16 h，炉冷		727

④ 弯曲性能 板材的室温弯曲角见表 7.4-65。

表 7.4-65 TB3 钛合金板材室温弯曲角

品种	δ/mm	状态	取样方向	α ($D=4\delta$) / (°)	回弹角/ (°)
板材	0.8～4.5	800℃，30 min，空冷	L	>140	19
			LT	>139	18
		ST+550℃，16 h，空冷	L	24	—
			LT	30	—

⑤ 扭转与剪切性能

（Ⅰ）棒材的室温扭转性能见表 7.4-66。

表 7.4-66 TB3 钛合金棒材室温扭转性能

品种	d/mm	状态	取样方向	τ/MPa
棒材	10	800℃，30 min，空冷	L	577
		ST+550℃，16 h，空冷		791

（Ⅱ）丝材、棒材的室温剪切性能见表 7.4-67。

表 7.4-67 TB3 钛合金丝棒材室温剪切性能

品种	d/mm	状态	取样方向	$\tau_{p0.3}$/MPa
丝材	2.5	800℃，30 min，空冷	L	731
	3.0			740
	3.5			683
	4.0			707
	6.0			670
棒材	8	800℃，30 min，空冷	L	664
		ST+500℃，24 h，空冷		825
		ST+550℃，16 h，空冷		740

（Ⅲ）丝材在各种温度下的剪切性能见表 7.4-68。

表 7.4-68 TB3 钛合金丝材在各种温度下的剪切性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	τ/MPa
丝材	4.0	800℃，30 min，空冷	L	20	696
				100	617
				200	541
				250	526
				300	518
				350	524
		ST + 550℃，16 h，炉冷	L	20	755
				350	653
				450	572
		ST + 770℃，30 min，炉冷到550℃，16 h，炉冷	L	20	736
				350	594
				450	534

⑥ 应力集中

（Ⅰ）室温缺口抗拉强度及缺口敏感系数见表 7.4-69。

表 7.4-69 TB3 钛合金室温缺口抗拉强度及缺口敏感系数

品种	d 或 δ/mm	状态	取样方向	K_t	σ_{bH}/MPa	σ_{bH}/σ_b
棒材	16	800℃，30 min，水淬	L	3.5	1 441	1.59
		ST + 500℃，16 h，空冷			1 695	1.24
		ST + 550℃，16 h，空冷			1 658	1.36
板材	1.8	800℃，30 min，水淬	LT	4.0	1 201	1.40
		ST + 500℃，16 h，空冷			884	0.66
		ST + 550℃，16 h，空冷			1 129	0.94

（Ⅱ）各种温度下的缺口抗拉强度及缺口敏感系数见表 7.4-70。

表 7.4-70 TB3 钛合金各种温度下的缺口抗拉强度及缺口敏感系数

品种	d/mm	状态	取样方向	K_t	θ/℃	σ_{bH}/MPa	σ_{bH}/σ_b
棒材	15	800℃，30 min，空冷 + 550℃，16 h，空冷	L	3.0	- 70	1 617	—
					- 40	1 665	—
					20	1 713	1.48
					150	1 650	—
					350	1 530	—
					450	1 415	—
		800℃，30 min，空冷 + 700℃，30 min，炉冷到550℃，16 h，炉冷	L	3.0	- 70	1 883	1.37
					- 40	1 840	—
					20	1 787	1.59
					150	1675	1.66
					350	1 483	1.65
					450	1 377	1.73

（Ⅲ）缺口应力断裂性能见表 7.4-71。

表 7.4-71 TB3 钛合金棒材缺口应力断裂性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	σ/MPa	试样数	持续时间/h	结果
棒材	15	800℃，30 min，空冷 + 550℃，16 h，空冷	L	20	1 276	3	5	未断
					1 380	3	5	断一个
				350	1 165	3	28	未断
		800℃，30 min，空冷 + 700℃，30 min，炉冷到550℃，16 h，炉冷	L	20	1 380	3	5	未断
					1 480	3	5	未断
				350	1 165	3	28	未断

注：试样尺寸及试验方法按 AMS4965D 进行。

⑦ 热稳定性

（Ⅰ）固溶处理丝材热暴露后的室温拉伸和剪切性能见表 7.4-72。

表 7.4-72 TB3 钛合金丝材热暴露后的室温拉伸和剪切性能

品种	d/mm	状态	取样方向	热暴露条件		σ_b/MPa	δ_{10}/%	ψ/%	τ/MPa
				θ/℃	t/h				
丝材	4.0	800℃，30 min，空冷	L	未暴露		887	17.8	74.0	725
				250	300	947	15.7	71.6	746
				300	200	921	15.2	65.0	740
				350	50	915	15.2	60.3	745

注：丝材表面带有氟硼酸盐涂层

（Ⅱ）固溶时效棒材试样热暴露后的室温拉伸性能见表 7.4-73。

表 7.4-73 TB3 钛合金棒材热暴露后的室温拉伸性能

品种	d/mm	状态	取样方向	热暴露条件			σ_b/MPa	δ_{10}/%	ψ/%	τ/MPa
				θ/℃	σ/MPa	t/h				
棒材	10	800℃，30 min，空冷 + 700℃，30 min，炉冷到550℃，16 h，炉冷	L	350	未暴露		1 220	1 183	17.0	38.0
					0	100	1 230	1 200	15.3	40.3
					785		1 180	—	20.5	48.0
					0	300	1 273	1 230	16.0	40.7
					785		1 203	1 177	16.0	28.7
					0	500	1 233	1 210	15.7	46.3
					785		1 210	1 175	19.7	50.0

3）持久和蠕变性能

① 高温持久性能见表 7.4-74。

表 7.4-74 TB3 钛合金高温持久性能

品种	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	$\sigma_{0.1/100}$/MPa
板材	1.8	800℃，30 min，空冷 + 500℃，24 h，空冷	LT	350	1 029
		800℃，30 min，空冷 + 550℃，16 h，空冷			882

② 高温蠕变性能见表 7.4-75。

表 7.4-75　TB3 钛合金高温蠕变性能

品种	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	$\sigma_{0.2/100}$/MPa
板材	2.0	800℃，30 min，空冷 +550℃，16 h，空冷	LT	300	813

4）疲劳性能　丝材和棒材的轴向加载疲劳极限见表 7.4-76。

表 7.4-76　TB3 钛合金丝材和棒材的轴向加载疲劳极限

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_b/MPa	K_t	R	f/Hz	N/周	σ_D/MPa
丝材	4	800℃，30 min，空冷	L	20	891	1	0.1	80	10^7	367
丝材	3.5	ST+500℃，24 h，空冷	L	20	925	1	0.1	80	10^7	344
棒材	15	ST+550℃，16 h，空冷	L	20	1 220	1	0.1	80	10^7	584
棒材	8	800℃，30 min，空冷	L	300	647	1	0.1	80	10^7	363

5）弹性性能

① 弹性模量　动态弹性性能见表 7.4-77。

表 7.4-77　TB3 钛合金动态弹性模量

品种	d/mm	状态	取样方向	E_D/GPa						
				20℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃
丝材	4.0	800℃，30 min，空冷	L	82	82	82	81	77	76	—
		ST+550℃，16 h，空冷	L	106	103	100	96	93	89	81

② 切变模量见表 7.4-78。

表 7.4-78　TB3 钛合金切变模量

品种	d/mm	状态	取样方向	G/GPa						
				20℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃
棒材	16	800℃，30 min，空冷+550℃，16 h，空冷	L	41	40	38	37	35	33	32

③ 泊松比　室温泊松比 $\mu=0.30$。

6）断裂性能　板材室温断裂韧度见表 7.4-79。

表 7.4-79　TB3 钛合金板材室温断裂韧度

品种	δ/mm	状态	取样方向	K_c/MPa $\sqrt{m}$	σ_b/MPa	$\sigma_{F0.2}$/MPa
板材	3~5	800℃，30 min，空冷+550℃，16 h，空冷	L－T	65.7	1 344	1 275

2.5　制造工艺和性能

1）热处理制度按 GJB3763—1999《钛及钛合金热处理规范》的规定。

① 固溶处理　固溶处理温度为 750~830℃，炉温波动范围为±10℃，保温 10~30 min，以空冷或更快的速度冷却。

② 时效　通常的时效温度为 500℃~550℃，时效时间 8~16 h，空冷或炉冷。具体的时效制度可按强度的要求而定。常用的时效制度为 550℃，16 h，空冷。

对于冷镦成型的螺栓，采用双重时效制度为 700℃，15~30 min，炉冷到 550℃，16 h，空冷或炉冷。

③ 去应力退火　680~730℃，30~60 min，空冷或炉冷。

④ 零件热处理工艺　螺栓的热处理在真空炉内进行，炉内绝对压强不应高于 9×10^{-2}Pa，抗拉强度为 1 100 MPa 的冷镦螺栓强化热处理工艺为：700℃±10℃，15~30 min，炉冷到 550℃，16 h，炉冷到 200℃，出炉空冷。

2）热变形工艺和性能　热变形工艺规范见表 7.4-80。

表 7.4-80　TB3 钛合金热变形工艺规范

热变形类型	加热温度/℃	终止温度/℃	一火变形量/%
铸锭开坯	1 100~1 150	≥850	30~60
坯料锻造	1 000~1 050	≥800	40~70
棒（线）材轧制	1 000~1 050	≥750	50~95
棒（线）材旋锻	730~760	≥600	10~30

3）成形工艺和性能

① 棒材和丝材的冷镦成形性能　作为铆钉和冷镦螺栓材料，必须能够承受大变形量的冷镦锻，一般认为 $D_f/D_0>2.0$ 时即可冷镦成铆钉或螺栓，$D_f/D_0>1.6$ 时即可进行冷铆。该合金在固溶处理状态均可满足这些临界值的要求，并能较容易地镦、铆成铆钉头。其冷镦比见表 7.4-81。

表 7.4-81　TB3 钛合金棒材和丝材的冷镦比

品种	d/mm	状态	试样尺寸/mm	冷镦比/$D_f/D_0$①	
丝材	4.0	800℃，30 min，空冷	d4×8	2.80 良好	2.90 开裂

① 顶锻试样的最终直径（D_f）与原始直径（D_0）之比，其中 D_0 等于试样原始高度的 1/2。

② 板材杯突成形性能见表 7.4-82。

表 7.4-82　TB3 钛合金板材杯突成形性能

状态	δ/mm	冲头直径 d/mm	杯突深度/mm	载荷/kN
固溶处理	4.5	20	8.6	200
	1.8	14	6.8	67

4）焊接工艺和性能　板材焊接接头的室温力学性能见表 7.4-83。

表 7.4-83　TB3 钛合金板材焊接接头的室温力学性能

品种	焊接方法	δ/mm	状态 焊前/焊后	取样方向	σ_b/MPa	δ_5/%	α/（°）
板材	钨极氩弧焊	1.8	ST/未处理	L	911	17	>112
			ST/固溶处理		902	15	—
			ST/550℃，16 h，空冷		1 190	7.6	30
		4.5	ST/550℃，16 h，空冷		1 147	6.5	—
	电子束焊	1.8	ST/550℃，16 h，空冷	L	1 200	8.2	—
	等离子焊	1.8	ST/550℃，16 h，空冷		1 163	7.5	—
		4.5	ST/550℃，16 h，空冷		1 122	7.4	—

5）表面处理工艺 镦制铆钉和螺栓时，为了避免粘模和钉杆划伤，在制钉前，丝材表面一定要施加润滑用的化学涂层，涂层工艺 见表7.4-84。

表7.4-84 TB3钛合金棒、丝材润滑用化学涂层工艺

溶液配方	溶液温度/℃	浸泡时间/h	表面颜色
氟硼酸钾 0.8 kg 氯化钡 0.8 kg 硝酸氨 0.4kg 水 10 L	70～90	0.5～1.5	灰黑色

2.6 选材及应用

1）选材 TB3钛合金棒丝材以它的高强度、抗疲劳和良好的冷镦性已应用于航天器、飞机和航空发动机的紧固件（图7.4-4），长期工作温度在300℃以下，短时使用可达500℃。

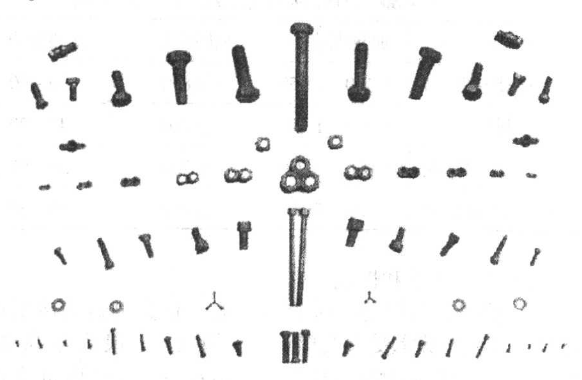


图7.4-4 TB3钛合金航空、航天用螺栓

在民用行业中，TB3作为弹性材料已用于应变压力传感器的弹性膜片和钛合金钓鱼竿中的稍体，利用板材的良好可冲断性能在某型号的喷火器装备中，作为轻质、高强度板手等工具已获得批量应用，该合金尚在推广阶段。

2）功能考核试验

① 螺栓性能

（Ⅰ）公制螺纹螺栓的室温抗拉强度见表7.4-85。

表7.4-85 TB3钛合金公制螺纹螺栓室温抗拉强度

螺栓规格	σ_b/MPa		螺栓规格	σ_b/MPa	
	ST+冷镦①	冷镦+时效②		ST+冷镦①	冷镦+时效②
M3	1 046	—	M6	1 059	1 268
M4	1 049	1 324	M8	1 055	1 238
M5	1 056	1 239	M10	—	1 224

注：表中每个数据均为10个六角头螺栓的平均值。

① 800℃，30 min，空冷+冷镦。

② 800℃，30 min，空冷+冷镦+700℃，30 min，炉冷到500℃，16 h，炉冷。

（Ⅱ）MJ螺纹螺栓的抗拉强度及抗剪强度见表7.4-86。

表7.4-86 TB3钛合金MJ螺纹螺栓的抗拉强度及抗剪强度

螺栓类型	规格	P_b/kN	σ_b/MPa	P_τ/kN	τ/MPa
100°沉头高锁	MJ4	10.37	—	9.12	726
平凸头高锁	MJ4	11.37	—	9.03	719
100°沉头高锁	MJ5	14.52	949	14.39	733
平头高锁	MJ5	17.19	1 124	14.31	729
100°沉头高锁	MJ6	19.88	914	20.42	723
100°十字沉头	MJ5	17.03	1 113	14.50	739
100°半沉头	MJ5	16.12	1 054	14.38	733
100°十字沉头	MJ6	23.32	1 072	20.75	734
扁圆头	MJ5	13.87	907	—	—

注：1. 表中每个数据均为10个螺栓的平均值。

2. 螺栓的热处理为800℃，30 min，空冷+冷镦+700℃，30 min，炉冷到550℃，16 h，炉冷。

（Ⅲ）MJ螺纹螺栓的轴向加载室温疲劳性能见表7.4-87。

表7.4-87 TB3钛合金MJ螺纹螺栓的轴向加载室疲劳性能

螺栓类型	规格	最大载荷	R	f/Hz	单件最小寿命 N/10[4] 周		平均寿命 N/10[4] 周	
					标准值	试验值	标准值	试验值
100°沉头高锁	MJ4	0.4P_b	0.1	82～87	4.5	13	6.5	13
平凸头高锁	MJ4	0.4P_b	0.1	82～87	4.5	13	6.5	13
100°沉头高锁	MJ5	0.4P_b	0.1	82～87	4.5	6.61	6.45	11.9
平头高锁	MJ5	0.4P_b	0.1	82～87	4.5	11.36	6.5	12.9
100°沉头高锁	MJ6	0.4P_b	0.1	82～87	4.5	8.52	6.5	11.76
100°十字沉头	MJ5	0.33P_b	0.25	82～87	1.5	6.0	3.0	6.0
100°半沉头	MJ5	0.33P_b	0.25	82～87	1.5	6.0	3.0	6.0
100°十字沉头	MJ6	0.33P_b	0.25	82～87	1.5	3.27	3.0	5.513

注：1. 螺栓的热处理为800℃，30 min，空冷+冷镦+700℃，30 min，炉冷到550℃，16 h，炉冷。

2. 高锁螺栓循环次数超过130 000次即停止试验，并以130 000次作为试验值；非高锁螺栓循环次数超过60 000次即停止试验，并以60 000次作为试验值。

② 铆钉性能

（Ⅰ）铆钉铆接后的室温拉伸和剪切性能见表7.4-88。

表7.4-88 TB3钛合金铆钉铆接后室温拉伸和剪切性能

品种	状态	d/mm	铆接方法	σ_b/MPa	ψ/%	τ/MPa
平锥头铆钉	固溶处理+冷镦和冷铆	4.0	铆枪铆接	939	71.7	671
			压铆	927	73.4	—

（Ⅱ）铆钉铆接后在各种温度下的抗拉强度见表7.4-89。

表7.4-89 TB3钛合金铆钉铆接后在各种温度下的抗拉强度

品种	状态	d/mm	σ_b/MPa				
			20℃	100℃	250℃	300℃	350℃
平头铆钉	固溶处理+冷镦和冷铆	3.0	923	773	682	671	668
埋头铆钉		3.0	917	806	690	680	659
平头铆钉		4.0	865	703	628	626	622
埋头铆钉		4.0	871	705	647	638	591

（Ⅲ）铆钉铆接后在各种温度下的抗剪强度见表7.4-90。

表 7.4-90　TB3 钛合金铆钉铆接后在各种温度下的抗剪强度

品种	状态	d/mm	σ_b/MPa				
			20℃	100℃	250℃	300℃	350℃
平头铆钉	固溶处理＋冷镦和冷铆	3.0	596	575	462	453	448
埋头铆钉		3.0	652	582	489	474	468
平头铆钉		4.0	602	500	437	431	425
埋头铆钉		4.0	591	498	441	428	424

（Ⅳ）铆钉铆接后的热稳定性　铆钉铆接后再经热暴露的室温抗拉强度和剪切强度见表 7.4-91。

表 7.4-91　TB3 钛合金铆钉铆接后再经热暴露后的室温抗拉强度和抗剪强度

品种	状态	d/mm	热暴露条件		σ_b/MPa	τ/MPa
			θ/℃	t/h		
平锥头铆钉	固溶处理＋冷镦和冷铆	4.0	未暴露		939	671
			250	300	960	737
			300	200	966	734
			350	50	—	740

（Ⅴ）铆接试验件 250℃剪切疲劳极限见表 7.4-92。

表 7.4-92　TB3 钛合金铆接试验件 250℃剪切疲劳极限

品种	规格 /mm	状态	θ/℃	R	f/Hz	N/周	τ_D/MPa
铆接件	平头铆钉 ϕ4.0	固溶处理＋冷镦和冷铆	250	0.1	5～25	2×10^6	142

3　TB5 钛合金

TB5 合金是一种亚稳定β型钛合金，其名义成分为 Ti－15V－3Cr－3Sn－3Al，含有同晶型β稳定元素 V、共析型β稳定元素 Cr、中性元素 Sn 和α稳定元素 Al。该合金具有优良的冷轧和冷成形性能，冷轧变形量可达 90%以上，可在室温下成形中等复杂的钣金零件，也可在 700℃以上进行超塑成形，并可冷镦铆钉和螺栓。该合金还可通过时效处理达到 1 240 MPa 以上的强度，并具有优良的焊接性能和耐腐蚀性能。TB5 合金主要用于制造各种钣金构件，也可制造紧固件，能满足高结构效益、高生产效率和低制造成本的要求，固溶处理状态的工作温度为 200℃以下，固溶时效状态的工作温度可达 290℃。该合金的半成品主要有薄板、带材和棒（线）材，也可生产管材和铸件。

该合金已用于制造飞机阻力伞梁和卫星远地点发动机支架和托锥，并通过鉴定。在民用方面，已用于制造高尔夫球头的打击面。

相近牌号：Ti－15V－3Cr－3Sn－3Al（美国）。

3.1　化学成分

Q/6S1058—1995“固溶处理 Ti－15V－3Cr－3Sn－3Al 钛合金薄板”和 Q/6S1206—1995“紧固件用 Ti－15V－3Cr－3Sn－3Al 钛合金棒（线）材”规定的化学成分见表 7.4-93。

表 7.4-93　TB5 钛合金的化学成分（质量分数）　%

合金元素					杂质≤						
V	Cr	Sn	Al	Ti	Fe	C	N	H	O	其他元素①	
										单个	总和
14.0～16.0	2.5～3.5	2.5～3.5	2.8～3.6	余量	0.25	0.05	0.05	0.015	0.13	0.10	0.40

①　产品出厂时供方可不检验其他元素，用户要求并在合同中注明时可予以检验。

3.2　物理及化学性能

1）密度 $\rho=4.77\ g/cm^3$。

2）热导率见表 7.4-94。

表 7.4-94　TB5 钛合金的热导率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
$\lambda/W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	6.1	7.3	8.8	10.4	12.0	13.7	15.4

3）比热容见表 7.4-95。

表 7.4-95　TB5 钛合金的比热容

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
$c/J\cdot kg^{-1}K^{-1}$	536	551	567	583	599	616	630

4）线胀系数见表 7.4-96。

表 7.4-96　TB5 钛合金的线胀系数

θ/℃	20～100	20～200	20～300	20～400	20～500	20～600
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	8.81	9.26	9.45	9.73	9.95	10.25

5）黑度系数见表 7.4-97。

表 7.4-97　TB5 钛合金的黑度系数

θ/℃	150	200	250	300
ε_n	0.21	0.24	0.27	0.29

6）电阻率见表 7.4-98。

表 7.4-98　TB5 钛合金的电阻率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
$\rho/\mu\Omega\cdot m$	1.45	1.48	1.51	1.54	1.57	1.59	1.60

7）磁性能　无磁性。

8）抗氧化性能　参见 TC4 合金。TB5 合金由于含有 15%V，因此其抗氧化性能比 TC4 合金差。

9）耐腐蚀性能　像大多数钛合金一样，当暴露于常见的环境条件时，TB5 合金具有优良的抗一般腐蚀能力。TB5 合金在飞机结构中使用时不需要进行专门的表面处理。但由于增氢原因，当 TB5 合金在有可能产生大量氢的环境条件下工作时，必须进行表面改性处理，以阻止增氢。TB5 钛合金与结构钢和铝合金的接触腐蚀行为同 TC4 钛合金。

3.3　相变及显微组织

1）相变温度　α＋β↔β相的转变温度为 750～770℃。

2）显微组织　合金在β相区固溶处理空冷或水淬后为单一β相，缓冷后的组织为β相基体上分布少量α相。固溶时效处理（480～675℃）的组织由β相和α相组成。

3.4　力学性能

1）技术标准规定的性能见表 7.4-99。

表 7.4-99 技术标准规定的 TB5 钛合金性能

技术标准	品种	δ 或 d/mm	取样方向	状态	室温						
					σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_{50}/%	δ_5/%	ψ/%	α/(°)	τ/MPa
Q/6S 1058—1995	板材	≤3.0	LT	固溶处理	705 ~ 945	690 ~ 870	≥12	—	—	≥105①	—
				ST + 540℃，8 h，空冷	≥1 000	≥965	≥7	—	—	—	—
				ST + 520℃，10 h，空冷	≥1 080	≥1 010	≥6	—	—	—	—
				ST + 480℃，16 h，空冷	≥1 240	≥1 170	≥5	—	—	—	—
Q/6S 1206—1995	棒（线）材	2.5 ~ 6.5	L	固溶处理	705 ~ 945	—	—	≥15	≥60	—	≥550
				ST + 540℃，8 h，空冷	≥1 000	≥965	—	≥10	≥25	—	≥650
				ST + 520℃，10 h，空冷	≥1 080	≥1 010	—	≥8	≥20	—	≥700

注：棒（线）材固溶处理状态的冷顶锻性能为：锻后高度与锻前高度之比为 1:3 时，锻饼圆周表面应无裂纹。

① $\delta \leq 1.8$ mm，$D = 4\delta$；$\delta > 1.8 \sim 3.0$ mm，$D = 5\delta$。

2）硬度见表 7.4-100。

表 7.4-100 TB5 钛合金的硬度

品种	δ/mm	θ/℃	状态	硬度 HV	硬度 HRC
板材	1.5	20	800℃，6 min，空冷	212	27.0
			ST + 540℃，8 h，空冷	—	39.0
			ST + 520℃，10 h，空冷	314	40.6

3）拉伸性能 各种温度下的拉伸性能见表 7.4-101。

表 7.4-101 TB5 钛合金板材在各种温度下的拉伸性能

品种	δ/mm	取样方向	状态	θ/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.01}$/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	$\sigma_{0.7}$/MPa	$\sigma_{0.85}$/MPa	δ_{50}/%
板材	1.5	LT	800℃，6 min，空冷	20	787	711	783	787	780	20.5
				100	707	582	681	688	678	19.2
				200	676	591	645	660	637	18.1
			ST + 540℃，8 h，空冷	-70	1 263	—	—	—	—	8.3
				20	1 109	842	1 021	1 094	1 014	11.0
				100	1 071	741	947	987	940	10.2
				150	1 068	—	922	961	911	9.7
				200	1 009	659	888	927	879	9.0
				250	1 001	—	865	906	856	8.6
				300	979	698	848	888	839	8.2
				350	966	640	831	876	822	8.4
			ST + 520℃，10 h，空冷	-70	1 343	—	—	—	—	7.3
				20	1 182	908	1 089	1 125	1 089	10.2
				100	1 136	798	1 011	1 051	1 004	9.6
				150	1 105	—	973	1 013	967	9.1
				200	1 072	714	948	991	939	8.4
				250	1 057	—	928	971	916	8.1
				300	1 045	695	905	954	895	7.6
				350	1 020	612	884	925	873	7.4
			ST + 480℃，16 h，空冷	-70	1 493	—	—	—	—	6.2
				20	1 315	—	1 207	—	—	8.5

4）压缩性能见表 7.4-102。

表 7.4-102 TB5 钛合金板材的压缩性能

品种	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	$\sigma_{pc0.2}$/MPa
板材	2.0	ST + 540℃，8 h，空冷	LT	20	1 050
		ST + 520℃，10 h，空冷			1 157

5）剪切性能见表 7.4-103。

表 7.4-103 TB5 钛合金的剪切性能

品种	d/mm	状态	θ/℃	τ/MPa
棒（线）材	3	800℃，15 min，空冷	20	632
	4	800℃，15 min，空冷	20	637
	6	800℃，15 min，空冷	20	661
			100	520
			200	500
		ST + 540℃，8 h，空冷	20	873
			100	748
			200	715
			300	660
		ST + 520℃，10 h，空冷	20	921
			100	780
			200	746
			300	690

6）承载性能见表 7.4-104。

表 7.4-104 TB5 钛合金板材的承载性能

品种	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	e/D	σ_{bru}/MPa	σ_{bry}/MPa
板材	1.5	800℃，6 min，空冷	LT	20	1.5	1 357	1 137
					2.0	1 884	1 294
		ST + 540℃，8 h，空冷	LT	2.0	1.5	1 724	1 458
					2.0	2 102	1 646
		ST + 520℃，10 h，空冷	LT	20	1.5	1 828	1 629
					2.0	2 154	1 871

7）热稳定性见表 7.4-105。

表 7.4-105 TB5 钛合金的热稳定性

品种	δ/mm	状态	取样方向	热暴露条件		σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_{50}/%
				θ/℃	t/h			
板材	1.5	ST + 540℃，8 h，空冷	LT	未暴露		1 123	1 042	10.1
				300	100	1 127	1 038	10.5
				300	300	1 138	1 049	10.1
				300	500	1 137	1 045	10.2
		ST + 520℃，10 h，空冷		未暴露		1 218	1 125	8.7
				300	100	1 214	1 122	8.7
				300	300	1 226	1 136	8.7
				300	500	1 213	1 128	8.5
		ST + 480℃，16 h，空冷		未暴露		1 315	1 207	8.5
				300	100	1 322	1 230	8.4
				300	300	1 342	1 257	8.1
				300	500	1 330	1 238	9.0
	1.8	ST + 冷轧 10% + 540℃，8 h，空冷	LT	未暴露		1 294	1 214	7.3
				300	500	1 297	1 212	6.7
		ST + 冷轧 10% + 520℃，10 h，空冷		未暴露		1 383	1 303	5.4
				300	500	1 396	1 302	5.2
	1.6	ST + 冷轧 20% + 540℃，8 h，空冷	LT	未暴露		1 289	1 194	7.0
				300	500	1 302	1 215	6.2
		ST + 冷轧 20% + 520℃，10 h，空冷		未暴露		1 398	1 320	4.8
				300	500	1 411	1 317	5.0

8）持久和蠕变性能见表 7.4-106。

表 7.4-106 TB5 钛合金板材的高温持久和蠕变性能

品种	δ/mm	状 态	取样方向	θ/℃	σ_{100}/ MPa	$\sigma_{0.2/100}$/MPa
板材	1.5	800℃，6 min，空冷 + 520℃，10 h，空冷	LT	300	1 030	800

9）疲劳性能

① 板材室温轴向加载疲劳极限见表 7.4-107。疲劳 *S-N* 曲线见图 7.4-5 和图 7.4-6。

表 7.4-107 TB5 钛合金板材的室温轴向加载疲劳极限

品种	δ/mm	状态	取样方向	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	K_t	R	f/Hz	N/周	σ_D/MPa
板材	1.5	800℃，6min，空冷 +540℃，8h，空冷	LT	1 109	1 021	1	0.1	116	10^7	625
						3	0.1	116	10^7	290
		800℃，6 min，空冷 + 520℃，10 h，空冷	LT	1 182	1 098	1	0.1	116	10^7	615
						3	0.1	116	10^7	298
						5	0.06	86	5×10^6	160
						2.5①	0.06	86	5×10^6	315
							0.5	86	5×10^6	408

① 试样工作部分宽 15 mm，中心孔直径 3 mm。

② 板材不同连接接头的室温轴向加载疲劳性能（DFR 值）见表 7.4-108。

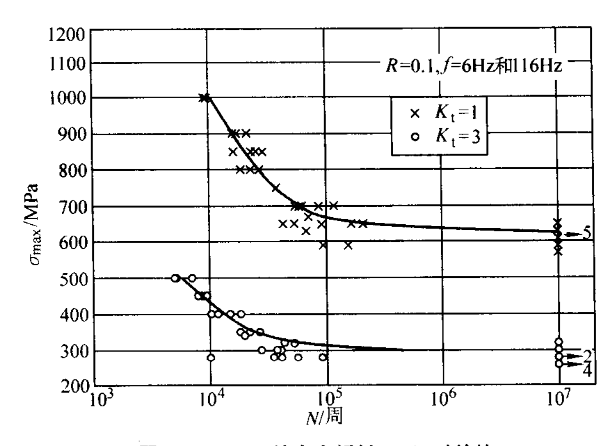


图 7.4-5 TB5 钛合金板材 540℃时效的室温光滑及缺口（K_t = 3）*S-N* 曲线

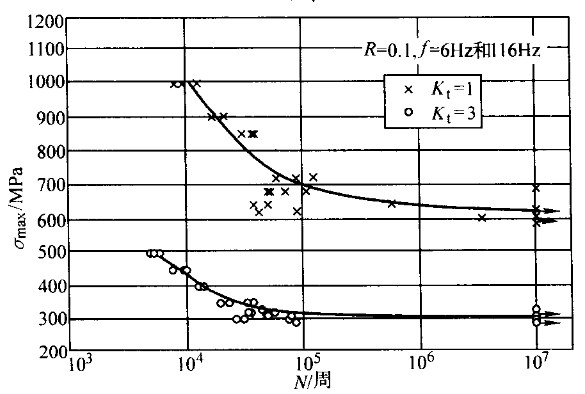


图 7.4-6 TB5 钛合金板材 520℃时效的室温光滑及缺口（K_t = 3）*S-N* 曲线

表 7.4-108 TB5 钛合金板材不同连接接头的室温轴向加载疲劳性能（DFR 值）

品种	δ/mm	状态	取样方向	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	连接方式	R	f /Hz	DFR /MPa
板材	2.0	800℃，8 min，空冷+520℃，10 h，空冷	LT	1 201	1 109	螺接	0.06	10~16	115.85
	1.5	800℃，6 min，空冷+520℃，10 h，空冷		1 184	1 094	铆接	0.06	30	119.66
						点焊	0.06	15	55.72

10）弹性性能

① 拉伸弹性模量见表 7.4-109。

表 7.4-109 TB5 钛合金的拉伸弹性模量

品种	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	E/GPa
板材	1.5	800℃，6 min，空冷	LT	20 100 200	77.3 77.9 76.9
		ST+540℃，8 h，空冷	LT	20 100 200 300	102 101 96.8 89.7
		ST+520℃，10 h，空冷	LT	20 100 200 300 350	102 100 97.6 93.9 91.6

② 压缩弹性模量见表 7.4-110。

表 7.4-110 TB5 钛合金的压缩弹性模量

品种	δ/mm	状态	取样方向	θ/℃	E_c/GPa
板材	2.0	800℃，8 min，空冷+540℃，8 h，空冷	LT	20	101
		800℃，8 min，空冷+520℃，10 h，空冷		20	103

③ 动态弹性模量见表 7.4-111。

表 7.4-111 TB5 钛合金的动态弹性模量

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	E_D/GPa
棒材	14	800℃，30 min，水淬	L	20 100 200 300 400	74.7 74.6 74.4 72.6 69.7
		ST+540℃，8 h，空冷	L	20 100 200 300 400	100.6 98.3 95.1 92.3 88.3

④ 切变模量见表 7.4-112。

表 7.4-112 TB5 钛合金的切变模量

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	G/GPa
棒材	14	800℃，30 min，水淬	L	20 100 200 300 400	30.1 30.0 29.6 29.0 28.3
		ST+540℃，8 h，空冷	L	20 100 200 300 400	39.1 38.1 36.8 35.6 34.1

⑤ 泊松比见表 7.4-113。

表 7.4-113 TB5 钛合金的泊松比

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	μ
棒材	14	800℃，30 min，水淬	L	20 100 200 300 400	0.24 0.24 0.26 0.25 0.23
		ST+540℃，8 h，空冷	L	20 100 200 300 400	0.29 0.29 0.29 0.30 0.29

11）断裂性能

① 断裂韧度　板材的断裂韧度见表 7.4-114。

表 7.4-114 TB5 钛合金的断裂韧度

品种	δ/mm	状态	试样类型	取样方向	θ/℃	K_C/MPa·m$^{1/2}$	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa
板材	1.5	800℃，6 min，空冷+540℃，8 h，空冷	CT	T-L	20	113.4	1 109	1 021
		800℃，6 min，空冷+520℃，10 h，空冷				91.1	1 182	1 089
		800℃，6 min，空冷+480℃，16 h，空冷				79.7	1 315	1 207
	2.0	800℃，8 min，空冷+540℃，8 h，空冷	CT	L-T T-L	20	106.8 107.4	1 081 1 108	997 1 012
		800℃，8 min，空冷+520℃，10 h，空冷		T-L	20	91.5	1 206	1 119

② 疲劳裂纹扩展速率　板材的疲劳裂纹扩展速率见图 7.4-7 和图 7.4-8。

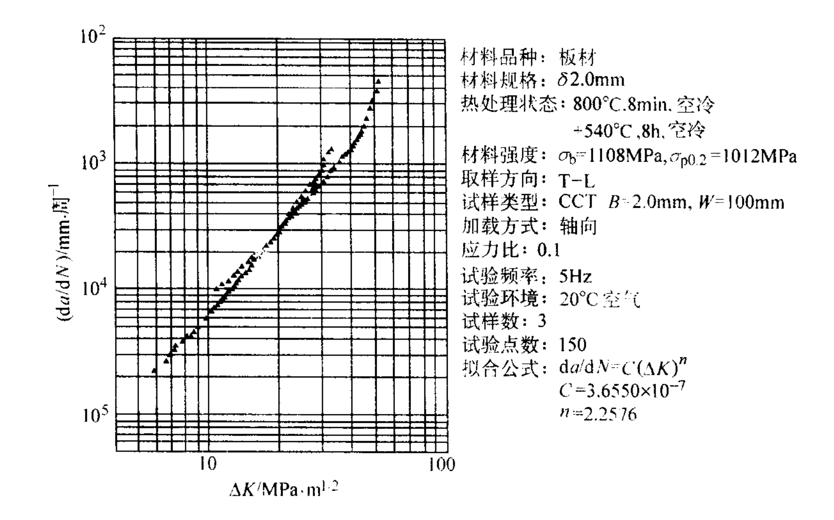


图 7.4-7 TB5 钛合金板材 540℃时效的室温 $da/dN-\Delta K$ 曲线

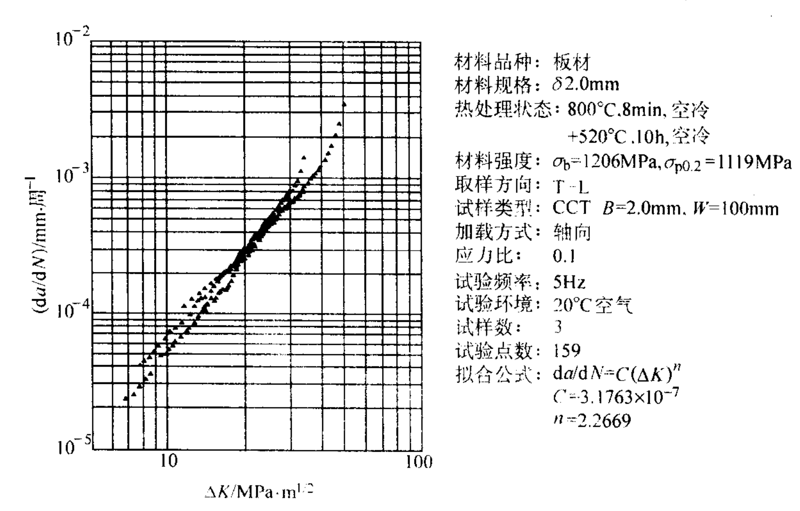


图 7.4-8 TB5 钛合金板材 520℃时效的室温 $da/dN-\Delta K$ 曲线

3.5 制造工艺及性能

1）热处理制度

① 固溶处理 在 760～815℃范围或 790～815℃范围内选定固溶处理温度，通常的固溶处理制度是 800℃ ± 15℃，3～30 min，空冷或更快冷却。

② 时效 时效温度为 480～675℃，时效时间 2～24 h，按强度等级通常采用 3 种时效制度，温度波动范围为 ± 6℃。

强度等级	时效制度
$\sigma_b \geq 1\,000$ MPa，$\delta_{50} \geq 7\%$	540℃，8 h，空冷
$\sigma_b \geq 1\,080$ MPa，$\delta_{50} \geq 6\%$	520℃，10 h，空冷
$\sigma_b \geq 1\,240$ MPa，$\delta_{50} \geq 5\%$	480℃，16 h，空冷

③ 去应力退火 680～710℃，30～60 min，空气中或惰性气体中冷却或随炉冷却。

④ 零件热处理工艺 TB5 合金主要制造钣金构件。经过冷成形以后的 TB5 合金钣金零件不再进行，也不允许进行固溶处理（避免因临界变形程度而使 β 晶粒急剧长大），而是直接进行时效处理。时效制度是根据零件强度的设计要求确定，一般采用 520℃，10 h 或 540℃，8 h。为了保证零件表面光洁，TB5 合金零件一般在真空炉中或惰性气体保护下进行时效处理。真空炉内的真空工作压强应不大于 6.7×10^{-2} Pa。较复杂的零件处理时应采用合适的时效夹具以避免零件变形。时效以后的冷却可以采用高纯氩气冷却，也可随炉冷却，并在 200℃以下出炉。

2）冷成形性能见表 7.4-115 和表 7.4-116。

表 7.4-115 TB5 钛合金板材的冷成形性能

品种	δ/mm	状态	θ/℃	杯突值 /mm	极限拉深系数	极限翻边系数	凸耳率 /%	扩孔率 /%
板材	1.5	800℃，6 min，空冷	20	10.2	1.80	—	—	51.0
	1.2	800℃，6 min，空冷		9.5	1.80	2.0	6.5	58.7
	0.8	800℃，8 min，空冷		8.0	1.80	—	4.7	—

表 7.4-116 TB5 钛合金板材的弯曲性能

品种	δ/mm	状态	θ/℃	取样方向	最小弯曲半径/mm	平均回弹角/（°）
板材	1.5	800℃，6 min，空冷	20	L	0.8	9
				LT	1.0	8
	1.2	800℃，6 min，空冷		L	0.6	8
				LT	0.8	9.5
	0.8	800℃，8 min，空冷		L	0.4	9
				LT	0.4	8.5

注：弯曲角为 90°。

3）热变形工艺规范见表7.4-117。

表7.4-117　TB5钛合金的热变形工艺规范

热变形类型	加热温度/℃	终止温度/℃	一火变形量/%
铸锭开坯	1 100～1 150	≥850	30～60
坯料锻造	950～1 050	≥800	40～60
板坯开坯	1 000～1 050	≥800	40～60
板材轧制	900～950	≥800	40～60
棒材轧制	800～900	≥750	50～80
棒（线）材旋锻	700～740	≥600	10～20

4）棒材的工艺塑性见图7.4-9。

5）板材的超塑成形工艺　根据TB5合金板材的抗拉强度、断后伸长率和 m 值与变形温度的关系，推荐的超塑成形工艺可以采用冷轧状态或固溶处理状态的板材，成形温度选择在 β 转变温度以下的700～740℃，应变速率可以在较宽的范围，不大于 $2.8\times10^{-3}s^{-1}$。超塑成形的零件应从成形温度尽快炉冷到500～540℃，保温2 h，继续炉冷到200℃以下出炉。对零件的强度要求不高时，也可从成形温度直接炉冷至200℃以下出炉。

6）焊接性能

① 点焊接头力学性能见表7.4-118。

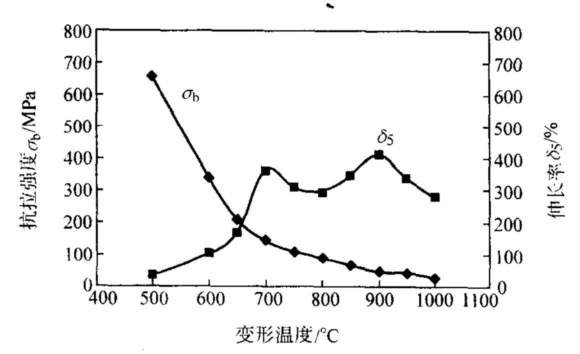


图7.4-9　TB5钛合金棒材的工艺塑性

表7.4-118　TB5钛合金板材点焊接头的力学性能

品种	δ/mm	焊前状态	θ/℃	熔核直径/mm	抗剪强度 P_τ/kN·点$^{-1}$	正拉强度 P_b/kN·点$^{-1}$	(P_b/P_τ)/%
板材	0.8	800℃，8 min，空冷 +520℃，10 h，炉冷	20	3.5	6.6	—	—
				4.4	8.9	—	—
				4.9	9.6	—	—
	1.2	800℃，6 min，空冷	20	4.9	13.5	8.1	60.0
				5.6	14.5	8.1	55.9
				6.3	16.3	9.9	60.7
		ST+540℃，8 h，炉冷		4.9	13.0	5.5	42.3
				5.7	14.9	7.2	48.3
				6.4	17.1	—	—
	1.5	800℃，6 min，空冷 +540℃，8 h，炉冷	20	6.0	19.0	9.5	50.0
				6.5	21.6	9.3	43.1
				7.1	23.5	9.1	38.7
			100	6.5	20.1	11.9	59.2
			200	6.5	18.6	10.7	57.5
			300	6.5	17.8	10.2	57.3
	2.0	800℃，8 min，空冷 +520℃，10 h，炉冷	20	6.5	27.4	—	—
				7.2	30.1	—	—
				7.8	30.5	—	—

② 钨极氩弧焊接头室温拉伸性能见表7.4-119。

表7.4-119　TB5钛合金板材钨极氩弧焊接头的室温拉伸性能

品种	δ/mm	状态		接头性能		母材性能		接头强度系数/%
		焊前/焊后	母材	σ_b/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	δ_5/%	
板材	1.2	800℃，6 min，空冷/520℃，10 h，炉冷	STA	1 245	7.2	1 209	15.7	100
	1.5	800℃，6 min，空冷/520℃，10 h，炉冷	STA	1 212	8.1	1 204	16.2	100
		800℃，6 min，空冷/未处理	ST	795	21.4	818	26.1	97

续表 7.4-119

品种	δ/mm	状态		接头性能		母材性能		接头强度系数/%
		焊前/焊后	母材	σ_b/MPa	δ_5/%	σ_b/MPa	δ_5/%	
板材	2.0	800℃，8 min，空冷/520℃，10 h，炉冷	STA	1 248	8.2	1 218	12.8	100
		800℃，8 min，空冷/未处理	ST	804	18.9	819	27.0	98

③ 钨极氩弧焊接头室温弯曲角见表 7.4-120。

表 7.4-120 TB5 钛合金板材钨极氩弧焊接头的室温弯曲角

品种	δ/mm	状态 焊前/焊后	弯曲半径/mm	α[①]/(°)
板材	1.5	800℃，6 min，空冷/520℃，10 h，炉冷	1.5	11.3
	2.0	800℃，8 min，空冷/520℃，10 h，炉冷	2.0	18.0
		800℃，6 min，空冷/未处理	2.0	180[②]

① α 为刚出现裂纹时的弯曲角。
② 弯曲 180°未出现裂纹。

④ 钨极氩弧焊接头高温力学性能见表 7.4-121。

表 7.4-121 TB5 钛合金钨极氩弧焊接头的高温力学性能

品种	δ/mm	状态 焊前/焊后	θ/℃	拉伸性能		持久强度
				σ_b/MPa	断口位置	σ_{100}/MPa
板材	1.5	800℃，6 min，空冷/520℃，10 h，炉冷	100	1 157	母材	—
			300	1 060	母材	1 050
		母材 STA	100	1 136	—	—
			300	1 045	—	1 030

3.6 选材及应用

TB5 钛合金主要用于制造飞机结构中的高强度钣金零件以及用于冷铆的铆钉。已用于制造飞机阻力伞梁（1 080 MPa 强度等级）及配套的铆钉，见图 7.4-10。在卫星结构中已用于制造远地点发动机支架和托锥。在民用方面，已用于制造高尔夫球头的打击面。

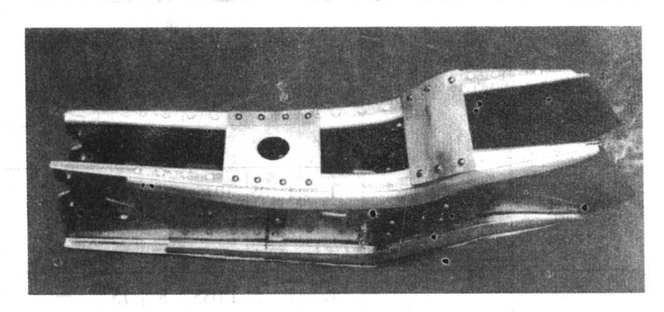


图 7.4-10 TB5 钛合金制造的飞机阻力伞梁及配套的铆钉

4 TB6 钛合金

TB6 钛合金是一种 Ti－Al－V 系近β型钛合金，含有3% α稳定元素 Al，10%同晶型β稳定元素 V 和 2%共析型β稳定元素 Fe。TB6 钛合金名义成分的铝当量为 4.0，钼当量为 11.1，其β稳定元素总含量接近临界浓度（～11%）。β稳定元素总含量的增加提高了合金的热处理强化能力。少量的α稳定元素 Al 不仅进一步强化α相，还可以抑制在淬火和时效过程中ω相的形成。

TB6 钛合金的主要特点是比强度高、断裂韧性好、锻造温度低和抗应力腐蚀能力强，适合于制造高强度的钛锻件。该合金的综合力学性能可以通过热处理在广阔范围内调整，实现不同强度、塑性和韧性水平的匹配。满足损伤容限设计的需要和高结构效益、高可靠性及低制造成本的要求。

TB6 钛合金在固溶时效状态下使用，最大淬透截面为 125 mm。主要半成品形式是棒材和锻件，也可以制成厚板和型材，特别适合于制造等温模锻件和热模具模锻件。TB6 钛合金可以用各种方式进行焊接，长时间工作温度达到 320℃。用于代替 30CrMnSiA 结构钢可减轻结构重量约 40%，代替 TC4 钛合金可减轻结构重量约 20%。TB6 钛合金在飞机和直升机制造中获得了广泛应用。

相近牌号：Ti－10V－2Fe－3Al（Ti－10－2－3）（美国）；IMI310（英国）；Ti－P.80（法国）。

4.1 化学成分

Q/6S 834—1990《Ti－1023 钛合金锻件》和 Q/6S 835—1990《Ti－1023 钛合金棒材》规定的化学成分见表 7.4-122。

表 7.4-122 TB6 钛合金化学成分（质量分数）/%

合金元素				杂质，不大于						
Al	V	Fe	Ti	C	N	H	Y	O	其他元素[②] 单个	其他元素[②] 总和
2.6～3.4	9.0～11.0	1.6～2.2	余量	0.05	0.05	0.015[①]	0.005	0.13	0.10	0.30

① Q/6S 835—1990 规定 $H \leqslant 0.0125\%$。
② 其他元素（Mo，Cr，Sn，Zr，Cu，Si，B）和 Y 在正常情况可不测，当需方认为必要时进行检验。

4.2 物理及化学性能

1）密度 $\rho = 4.62\ g/cm^3$。
2）熔化温度范围 1 650℃ ± 14℃。
3）热导率见表 7.4-123。

表 7.4-123 TB6 钛合金热导率

θ/℃	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
$\lambda/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	6.79	7.63	8.47	9.31	10.2	11.0	11.8	12.7	13.5	14.4	15.2

4）比热容见表 7.4-124。

表 7.4-124 TB6 钛合金比热容

θ/℃	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
$c/J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	589	604	626	640	649	655	670	690	710	730	749

5）线胀系数见表 7.4-125。

表 7.4-125 TB6 钛合金线胀系数

θ/℃	20～100	20～200	20～300	20～400	20～500	20～600	20～700	20～800
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	8.9	9.1	9.1	9.4	10.2	11.2	13.0	13.3

6）电性能　电阻率见表 7.4-126。

表 7.4-126　TB6 钛合金电阻率

θ/℃	20	100	200	300	400	500
$\rho/\mu\Omega\cdot m$	1.39	1.43	1.48	1.53	1.57	1.60

7）磁性能　无磁性。

8）抗氧化性能　参见 TC4 钛合金。

9）耐腐蚀性能　像大多数钛合金一样，当暴露于常见的环境条件时，TB6 钛合金具有优良的抗一般腐蚀能力。TB6 钛合金在飞机结构中使用时不需要进行专门的表面处理。然而，如同所有的 β 钛合金，TB6 钛合金与 α 和 α－β 型钛合金比较，对氢有更大的亲合力。因此，当 TB6 钛合金在有可能产生大量氢的环境条件下工作时，必须进行表面改性处理，以阻止增氢。

TB6 钛合金与结构钢或铝合金相接触时，主要是偶对中作为阳极的结构钢或铝合金零件发生腐蚀，这种腐蚀包括电偶腐蚀和自身腐蚀。TB6 钛合金在偶对中作为阴极，在 3.5%NaCl 的中性溶液中，主要发生溶氧的还原反应，即 $O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^-$。这一反应的大小决定着电偶电流的大小，TB6 钛合金阳极化后与其他金属接触，可降低电偶电流，减缓接触腐蚀。

4.3　相变及显微组织

1）相变

① 相变温度 α＋β↔β 转变温度为 800℃ ± 15℃。

② 时间-温度-转变图见图 7.4-11。

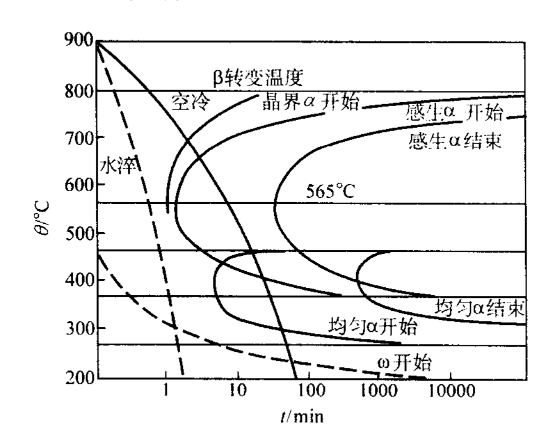


图 7.4-11　TB6 钛合金的时间-温度-转变图（T－T－T 图）

③ 相组成与固溶处理加热温度的关系见表 7.4-127。

表 7.4-127　TB6 钛合金相组成与固溶处理加热温度的关系

加热温度/℃	相组成
700	β＋α
730	β＋α＋微量 ω
750～790	β＋α＋少量 α″＋微量 ω
800～805	β＋少量 α＋少量 α″＋微量 ω
810～850	β＋少量 α″＋微量 ω

④ 相组成与时效加热温度的关系见表 7.4-128。

2）显微组织

① TB6 钛合金在平衡状态下由 α 和 β 相组成，700℃固溶处理后的 α 相含量约为 40%。从 β 相区水冷可以将 β 相 100%保留下来，形成粗大等轴 β 晶粒。从 β 相区空冷后的显微组织由保留 β 相、晶界 α 相和片状初生 α 相组成。TB6 钛合金半成品显微组织中的初生 α 相可能具有片状或球状两种形态，其球化程度取决于 α＋β 相区变形量和再结晶过程。

表 7.4-128　TB6 钛合金相组成与时效加热温度的关系

加热温度/℃	相转变	相组成
≤275	① α″→β 逆转变 ② β→β ＋ωi	β＋微量 ωa＋微量 ωi
275～380	① β→β＋ωi ② α″→β 逆转变 ③ ωa →ωi ④ ωi →均匀 α	β＋ωi ＋少量均匀 α
380～470	① β→β ＋ωi →β ＋均匀 α ② β→β＋感生 α	β＋均匀 α＋少量感生 α
470～565	① β→β＋感生 α ② β→β＋ωi →β＋均匀 α	β＋感生 α＋少量均匀 α
＞565	① β→β＋感生 α ② β→晶界 α	β＋感生 α＋少量晶界 α

② TB6 钛合金从 α＋β 相区水冷后的显微组织为亚稳定 β 基体上分布着初生 α 相颗粒。随着加热温度的升高，初生 α 相颗粒的数量减少，尺寸增大。从加热温度以不同速度冷却，会导致初生 α 相颗粒形状、尺寸和数量的变化。用空冷代替水冷后，初生 α 相的含量、球状颗粒的比例和平均直径都会增加，从而导致强度降低，塑性和断裂韧性提高。

③ TB6 钛合金固溶时效处理后的显微组织为初生 α 相和由次生 α 相，弥散强化的 β 相。次生 α 相的弥散程度主要取决于时效温度和保温时间，480℃时效后析出非常细小弥散的片状次生 α 相。随着时效温度的升高，片状次生 α 相的厚度和长宽比增大，从而导致强度降低，塑性和断裂韧性提高。

4.4　力学性能

1）技术标准规定的力学性能见表 7.4-129。

表 7.4-129　技术标准规定的 TB6 钛合金力学性能

技术标准	品种	状态	d 或 δ /mm	取样方向①	室温 σ_b /MPa ≥	$\sigma_{p0.2}$ /MPa ≥	δ_5 /% ≥	ψ/% ≥	K_{IC} /MPa·m$^{1/2}$ ≥
Q/6S 834—1990	锻件	固溶时效	≤100	L	1 105	1035	8	15	—
				LT	1 105	1 035	6	10	—
				T－L	—	—	—	—	60
Q/6S 835—1990	棒材	固溶时效	21～125	L	1 105	1 035	8	15	—
				LT	1 105	1 035	6	10	—
				C－R	—	—	—	—	55
			＞100～125	镦饼 C	1 105	1 035	6	10	—
				镦饼 C－R	—	—	—	—	60

① 直径小于或等于 100 mm 的棒材，直接从棒材上取样检查力学性能。直径大于 100 mm 的棒材，可直接从棒材上取样检查力学性能，也可以按规定工艺镦饼后取样检查力学性能。

2）各种温度下的力学性能

① 硬度 固溶时效状态的室温硬度335～375HBS。

② 拉伸性能 各种温度下的拉伸性能见表7.4-130和表7.4-131。

表7.4-130 TB6钛合金棒材在各种温度下的拉伸性能

品种规格	状态	取样方向	θ/℃	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	$\sigma_{p0.1}$ /MPa	$\sigma_{p0.01}$ /MPa	δ_5 /%	ψ/%
棒材 d = 20 mm	760℃，2 h，水淬+510℃，8 h，空冷	L	-60	1 348	—	—	—	11.0	28.6
			-30	1 307	—	—	—	9.6	33.4
			20	1 168	1 128	1 115	1 045	14.4	49.4
			100	1 047	994	989	953	18.0	60.6
			150	1 045	975	963	927	17.0	61.8
			200	990	908	899	867	18.5	65.3
			250	975	869	860	832	16.8	64.8
			300	971	860	844	814	17.0	69.2
			350	963	840	816	770	16.8	70.8

表7.4-131 TB6钛合金模锻件在各种温度下的拉伸性能

品种规格	状态	θ/℃	取样方向	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	$\sigma_{p0.01}$ /MPa	δ_5/%	ψ/%
模锻件 δ≤100 mm	760℃，2 h，水淬+520℃，8 h，空冷	20	L	1 197	1 154	1 037	11.1	43.8
			LT	1 160	1 113	1 011	10.4	37.2
		100	L	1 118	1 045	898	11.1	44.2
			LT	1 103	1 026	890	12.2	49.6
		200	L	1 035	944	816	12.8	56.3
			LT	1 041	941	806	12.2	56.5
		250	L	1 023	913	773	12.7	57.5
			LT	997	885	740	12.1	55.8
		300	L	1 014	904	751	12.2	60.2
			LT	982	854	709	13.2	61.8
		350	L	978	844	691	12.4	60.4
			LT	959	827	639	13.2	65.0

拉伸应力-应变曲线见图7.4-12和图7.4-13。

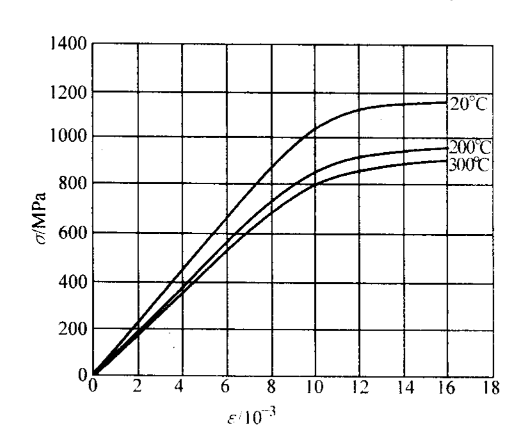


图7.4-12 TB6钛合金棒材的拉伸应力-应变曲线

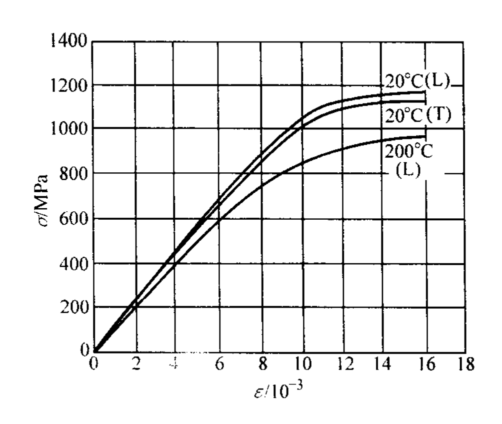


图7.4-13 TB6钛合金模锻件的拉伸应力-应变曲线

③ 压缩性能见表7.4-132。

表7.4-132 TB6钛合金压缩性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	$\sigma_{pc0.2}$/MPa
棒材	20	760℃，2 h，水淬+510℃，8 h，空冷	L	20	1 123

④ 冲击性能见表7.4-133。

表7.4-133 TB6钛合金冲击性能

品种	棒材							
d/mm	20							
状态	760℃，2 h，水淬+510℃，8 h，空冷							
取样方向	L							
θ/℃	-70	-40	-20	20	100	200	320	350
a_{ku}/kJ·m^{-2}	47.4	56.1	62.9	67.5	94.1	138.4	154.3	169.3

⑤ 扭转与剪切性能 扭转性能见表7.4-134。剪切性能见表7.4-135。

表7.4-134 TB6钛合金扭转性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	τ_b /MPa	$\tau_{p0.3}$ /MPa	$\tau_{p0.1}$ /MPa
棒材	20	760℃，2 h，水淬+510℃，8 h，空冷	L	20	1 050	857	697
				200	909	706	550
				300	868	652	499
				350	836	623	477

表7.4-135 TB6钛合金剪切性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	τ/MPa
棒材	20	760℃，2 h，水淬+510℃，8 h空冷	L	20	682

⑥ 承载性能见表7.4-136。

表7.4-136 TB6钛合金承载性能

品种	规格 /mm	状态	取样方向	θ/℃	e/D	σ_{bru} /MPa	σ_{bry} /MPa
锻坯	25×45	760℃，2 h，水淬+510℃，8 h，空冷	L	20	1.5	1 735	1 426
				20	2.0	1 801	1 686

⑦ 应力集中见表7.4-137。

表 7.4-137 TB6 钛合金应力集中

品种规格	状态	取样方向	θ/℃	σ_{bH}/MPa				σ_{bH}/σ_b			
				$K_t=2$	$K_t=3$	$K_t=4$	$K_t=5$	$K_t=2$	$K_t=3$	$K_t=4$	$K_t=5$
棒材 $d=20$ mm	760℃，2 h，水淬 +510℃，8 h，空冷 $\sigma_b=1\ 168$ MPa	L	20	1 673	1 747	1 723	1 677	1.44	1.50	1.48	1.44
			100	—	1 602	—	—	—	1.47	—	—
			150	—	1 549	—	—	—	1.50	—	—
			200	—	1 498	—	—	—	1.50	—	—
			250	—	1 485	—	—	—	1.46	—	—
			320	—	1 454	—	—	—	1.55	—	—
			350	—	1 422	—	—	—	1.53	—	—
棒材 $d=120$ mm	760℃，2 h，水淬 +510℃，8 h，空冷 $\sigma_b=1\ 149$ MPa	L	20	1 737	1 767	—	—	1.51	1.54	—	—
			320	—	1 466	—	—	—	1.49	—	—

⑧ 热稳定性　试样热暴露后的室温拉伸性能见表 7.4-138。

表 7.4-138 TB6 钛合金试样热暴露后的室温拉伸性能

品种规格	状态	取样方向	热暴露条件 θ/℃	t/h	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
棒材 $d=$ 20 mm	760℃，2 h，水淬 +510℃，8 h，空冷	L	未暴露		1 169	1 131	14.5	62.1
			320	100	1 142	1 113	17.6	62.3
			320	500	1 189	1 131	16.5	60.8
棒材 $d=$ 120 mm	760℃，2 h，水淬 +510℃，8 h，空冷	L	未暴露		1 149	1 097	13.2	53.3
			320	100	1 203	1 159	10.8	47.5
			320	500	1 208	1 160	12.7	51.7

3）持久和蠕变性能

① 高温持久性能见表 7.4-139。

表 7.4-139 TB6 钛合金高温持久性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	σ_{100}/MPa
棒材	20	760℃，2 h，水淬 +510℃，8 h，空冷	L	320	950
	75	740℃，2 h，水淬 +510℃，8 h，空冷	L	320	902
	120	760℃，2 h，水淬 +510℃，8 h，空冷	L	320	900

② 高温蠕变性能见表 7.4-140。

4）疲劳性能

① 高周疲劳　室温轴向加载疲劳极限见表 7.4-141。棒材光滑试样（$K_t=1$）室温轴向加载疲劳 S-N 曲线见图 7.4-14。棒材缺口试样（$K_t=3$）室温轴向加载疲劳 S-N 曲线见图 7.4-15。模锻件室温轴向加载疲劳 S-N 曲线见图 7.4-16。

表 7.4-140 TB6 钛合金高温蠕变性能

品种	d/mm	状态	取样方向	θ/℃	$\sigma_{0.2/100}$/MPa
棒材	20	760℃，2 h，水淬 +510℃，8 h，空冷	L	320	570
	75	740℃，2 h，水淬 +510℃，8 h，空冷	L	320	510

表 7.4-141 TB6 钛合金室温轴向加载疲劳极限

品种规格	状态	取样方向	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	K_t	R	f/Hz	N/周	σ_D/MPa
棒材 $d=$ 20 mm	760℃，2 h，水淬 +510℃，8 h，空冷	L	1 166	1 133	1	0.1	130	10^7	716
					1	0.5	130	10^7	912
					3	0.1	130	10^6	390
								10^7	388
					3	0.5	130	10^7	466
					3	−1	130	10^7	255
模锻件 $\delta\leqslant$ 100 mm	760℃，2 h，水淬 +520℃，8 h，空冷	L	1 197	1 154	1	0.1	130	10^7	770
					3	0.1	130	10^7	359

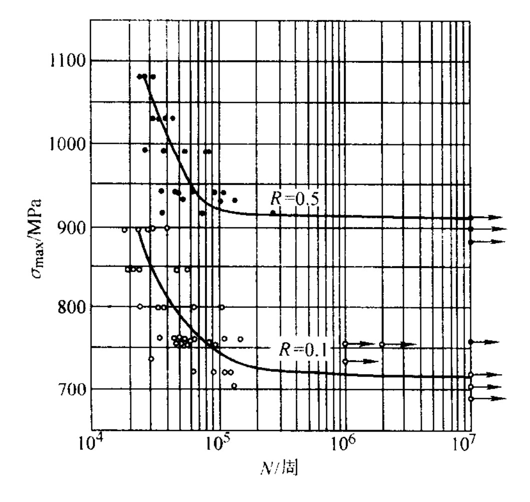


图 7.4-14 TB6 钛合金棒材光滑试样（$K_t=1$）室温轴向加载疲劳 S-N 曲线

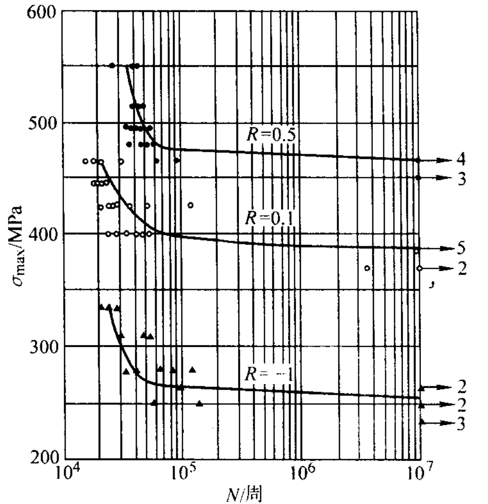


图 7.4-15 TB6 钛合金棒材缺口（$K_t=3$）试样室温轴向加载疲劳 $S-N$ 曲线

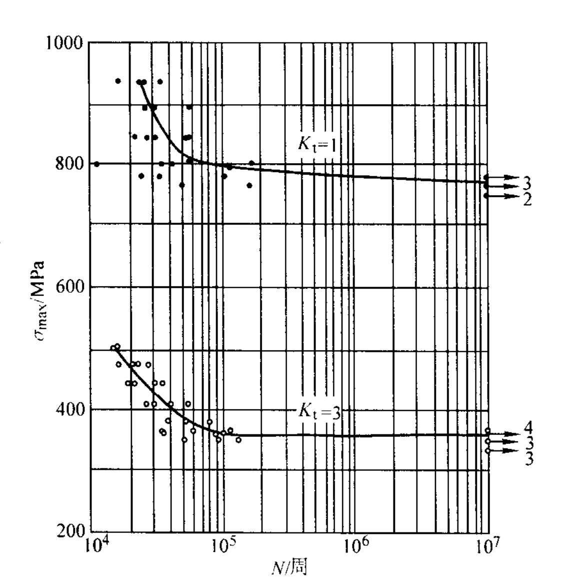


图 7.4-16 TB6 合金模锻件光滑和缺口（$K_t=3$）试样室温轴向加载疲劳 $S-N$ 曲线

② 低周疲劳 棒材室温应变控制低周疲劳数据及 $\varepsilon-N$ 曲线见表 7.4-142 和图 7.4-17。棒材 200℃应变控制低周疲劳数据及 $\varepsilon-N$ 曲线见表 7.4-143 和图 7.4-18。

③ 特种疲劳 耳片元件轴向加载疲劳极限见表 7.4-144。元件尺寸见图 7.4-19。耳片元件轴向加载疲劳 $S-N$ 曲线见图 7.4-20。

表 7.4-142 TB6 钛合金棒材室温应变控制低周疲劳数据

材料品种	棒材	试样尺寸	$d=6.35$ mm
材料规格	$d=20$ mm	加载波形	三角波
取样方向	L	应变比	-1
试验温度	20℃	试验频率	0.084 ~ 0.500 Hz
控制方法	轴向应变	失效判据	断裂
热处理状态	760℃，2 h，水淬 + 510℃，8 h，空冷		

续表 7.4-142

稳态迟滞回线特征值				$2N_f$/周	试样数量/根	
$\Delta\varepsilon_t/2$	$\Delta\varepsilon_e/2$	$\Delta\varepsilon_p/2$	$\Delta\sigma/2$/MPa			
%						
1.508 9	0.941 5	0.570 7	980	381	3	
1.208 3	0.945 7	0.262 7	984	1 217	5	
1.008 7	0.907 6	0.101 1	944	2 413	7	
0.806 6	0.803 0	0.007 4	844	6 058	5	
应变疲劳参数	σ'_f/MPa	b	ε'_f/%	C	K'/MPa	n'
	2 024	-0.107	132	-0.908	1 084	0.019
曲线的数学表达式	$\Delta\varepsilon_t/2=0.020\ (2N_f)^{-0.107}+1.318\ (2N_f)^{-0.908}$					
	$\Delta\sigma/2=1\ 048\ (\Delta\varepsilon_p/2)^{0.019}$					

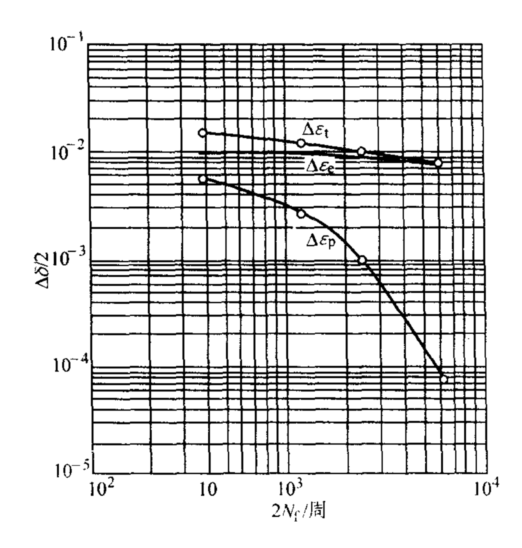


图 7.4-17　TB6 钛合金棒材的室温低周疲劳 $\varepsilon-N$ 曲线

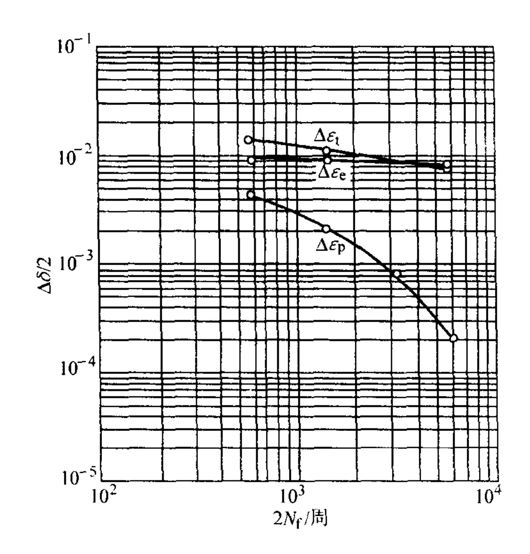


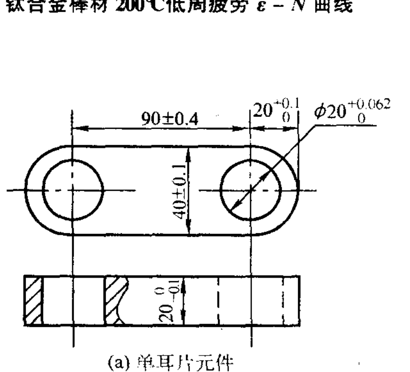
图 7.4-18　TB6 钛合金棒材 200℃低周疲劳 $\varepsilon-N$ 曲线

表 7.4-143　TB6 钛合金棒材 200℃应变控制低周疲劳数据

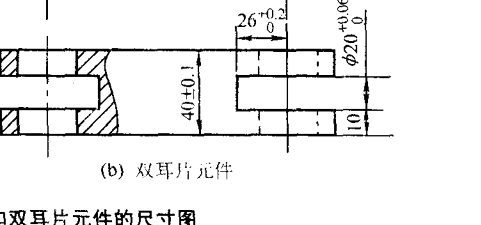
<table>
<tr><td>材料品种</td><td colspan="2">棒材</td><td colspan="2">试样尺寸</td><td colspan="2">$d=6.35$ mm</td></tr>
<tr><td>材料规格</td><td colspan="2">$d=20$ mm</td><td colspan="2">加载波形</td><td colspan="2">三角波</td></tr>
<tr><td>取样方向</td><td colspan="2">L</td><td colspan="2">应变比</td><td colspan="2">-1</td></tr>
<tr><td>试验温度</td><td colspan="2">200℃</td><td colspan="2">试验频率</td><td colspan="2">0.084~0.500 Hz</td></tr>
<tr><td>控制方法</td><td colspan="2">轴向应变</td><td colspan="2">失效判据</td><td colspan="2">断裂</td></tr>
<tr><td>热处理状态</td><td colspan="6">760℃，2 h，水淬+510℃，8 h，空冷</td></tr>
<tr><td colspan="4">稳态迟滞回线特征值</td><td rowspan="3">$2N_f$/周</td><td colspan="2" rowspan="3">试样数量/根</td></tr>
<tr><td>$\Delta\varepsilon_t/2$</td><td>$\Delta\varepsilon_e/2$</td><td>$\Delta\varepsilon_p/2$</td><td rowspan="2">$\Delta\sigma/2$/MPa</td></tr>
<tr><td colspan="3">%</td></tr>
<tr><td>1.413 7</td><td>0.929 8</td><td>0.433 9</td><td>836</td><td>587</td><td colspan="2">6</td></tr>
<tr><td>1.135 0</td><td>0.925 0</td><td>0.210 2</td><td>832</td><td>1 457</td><td colspan="2">10</td></tr>
<tr><td>0.947 4</td><td>0.867 0</td><td>0.080 4</td><td>780</td><td>3 289</td><td colspan="2">9</td></tr>
<tr><td>0.807 0</td><td>0.786 2</td><td>0.020 9</td><td>729</td><td>59 806</td><td colspan="2">6</td></tr>
<tr><td rowspan="2">应变疲劳参数</td><td>σ'_f/MPa</td><td>b</td><td>ε'_f/%</td><td>C</td><td>K'/MPa</td><td>n'</td></tr>
<tr><td>1 629</td><td>-0.109</td><td>220</td><td>-0.970</td><td>1 000</td><td>0.033</td></tr>
<tr><td rowspan="2">曲线的数学表达式</td><td colspan="6">$\Delta\varepsilon_t/2=0.020\ (2N_f)^{-0.109}+2.204\ (2N_f)^{-0.970}$</td></tr>
<tr><td colspan="6">$\Delta\sigma/2=1\ 000\ (\Delta\varepsilon_p/2)^{0.033}$</td></tr>
</table>

表 7.4-144　TB6 钛合金耳片元件轴向加载疲劳极限

<table>
<tr><td>品种规格</td><td>热处理状态</td><td>取样方向</td><td>σ_b/MPa</td><td>$\sigma_{p0.2}$/MPa</td><td>耳片型式</td><td>θ/℃</td><td>R</td><td>f/Hz</td><td>N/周</td><td>σ_D/MPa</td></tr>
<tr><td rowspan="2">锻坯 25 mm~45 mm</td><td rowspan="2">740℃，2 h，水淬+510℃，8 h，空冷</td><td rowspan="2">L</td><td rowspan="2">1 168</td><td rowspan="2">1 108</td><td rowspan="2">单耳</td><td>20</td><td>0.1</td><td>8.3</td><td>10^6</td><td>180</td></tr>
<tr><td>200</td><td>0.1</td><td>8.3</td><td>10^6</td><td>121</td></tr>
<tr><td>锻坯 45 mm+45 mm</td><td>760℃，2 h，水淬+510℃，8 h，空冷</td><td>L</td><td>1 215</td><td>1 149</td><td>双耳</td><td>20</td><td>0.1</td><td>8.3</td><td>10^6</td><td>163</td></tr>
</table>



(a) 单耳片元件



(b) 双耳片元件

图 7.4-19　单耳片元件和双耳片元件的尺寸图

5）弹性性能

① 弹性模量见表 7.4-145。

② 切变模量见表 7.4-146。

6）断裂性能

① 断裂韧性见表 7.4-147。

② 应力腐蚀断裂韧性见表 7.4-148。

③ 疲劳裂纹扩展速率　锻坯 $L-T$ 试样空气环境 $da/dN-\Delta K$ 曲线见图 7.4-21。锻坯 $L-T$ 试样腐蚀环境 $da/dN-\Delta K$ 曲线见图 7.4-22。锻坯 $T-L$ 试样空气环境 $da/dN-\Delta K$ 曲线见图 7.4-23。锻坯 $T-L$ 试样腐蚀环境 $da/dN-\Delta K$ 曲线见图 7.4-24。

④ 应力强度因子门槛值　$\Delta K_{th}\approx4.1\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$。

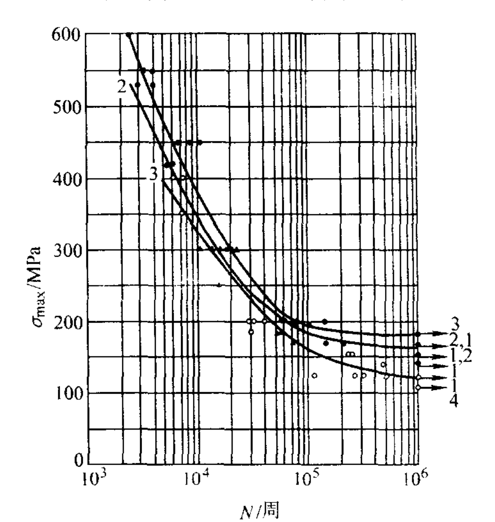
4.5　制造工艺和性能

1）热处理制度和性能

① 固溶处理　在低于 β 转变温度 30~60℃范围内选定固溶处理温度，典型的固溶处理温度是 760℃，2 h，水淬。对于厚度小于或等于 25 mm 的锻件允许采用空冷代替水淬。

TB6钛合金零件的最厚截面尺寸不应大于100 mm，当锻件厚度大于100 mm或局部区域大于100 mm时，则应采用机械加工方法去除一定的厚度再进行固溶处理。

② 时效 在510～540℃范围内选定时效温度，典型的



材料品种：锻坯
材料规格：1,3－δ25mm×45mm
2－δ45mm×45mm
热处理状态：1,3－740°C,2h,水淬+510°C,8h,空冷
2－760°C,2h,水淬+510°C,8h空冷
材料强度：1,3－σ_b=1168MPa,$\sigma_{p0.2}$=1108MPa
2－σ_b=1215MPa,$\sigma_{p0.2}$=1149MPa
试样类型：1,3－单耳片元件
2 双耳片元件
加载方式：轴向
应力比：0.1
试验频率：8.3Hz
试验环境：1,2－20°C,空气
3－200°C,空气
炉批数：1
试样数：68

图7.4-20 TB6合金耳片元件轴向加载疲劳S－N曲线

表7.4-145 TB6钛合金弹性模量

品种	棒材		棒材	模锻件	
规格	d＝20 mm		d＝120 mm	δ≤100 mm	
状态	760℃，2 h，水淬+510℃，8 h，空冷		760℃，2 h，水淬+510℃，8 h，空冷	760℃，2 h，水淬+520℃，8 h，空冷	
取样方向	L		L	L	T
θ/℃	E/GPa	E_c/GPa	E/GPa	E/GPa	E/GPa
20	104.0	106.9	101.4	108.2	108.5
100	—	—	—	99.1	99.2
200	89.9	—	—	95.1	94.6
250	—	—	—	92.5	89.8
300	85.7	—	—	89.0	87.3
320	—	—	76.4	—	—
350	—	—	—	84.4	83.7

时效温度是520℃，8 h，空冷。时效温度偏差不应超过±5℃。

时效温度每升高或降低10℃所引起的拉伸强度、断面收缩率和断裂韧性的相应变化分别为40 MPa、4.5%和6 MPa·m$^{1/2}$。当塑性和断裂韧性低于技术标准规定值，而强度较高时，允许将时效温度提高到550℃进行重复时效。

表7.4-146 TB6钛合金切变模量

品种	棒材			
规格	d＝20 mm			
状态	760℃，2 h，水淬+510℃，8 h，空冷			
取样方向	L			
θ/℃	20	200	300	350
G/GPa	41.3	38.4	36.4	34.3

表7.4-147 TB6钛合金断裂韧性

品种	规格/mm	状态	试样类型	取样方向	θ/℃	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$
锻坯	30×130	740℃，2 h，水淬+510℃，8 h，空冷	CT	L－T	－60	63.3
				L－T	－30	67.6
				L－T	20	83.5
				T－L	20	68.9
棒材	d 120	740℃，2 h，水淬+510℃，8 h，空冷	CT	L－T	20	82.2
				C－R	20	60.4
模锻件	δ≤100	760℃，2 h，水淬+520℃，8 h，空冷	CT	L－T	20	83.2
				T－L	20	76.2

表7.4-148 TB6钛合金应力腐蚀断裂韧性

品种	规格 mm	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	试样类型	取样方向	θ/℃	环境条件	K_{ISCC}/MPa·m$^{1/2}$	$\frac{K_{ISCC}}{K_{IC}}$
锻坯	30×130	740℃，2 h，水淬+510℃，8 h，空冷	1 168	1 108	悬臂弯曲	L－T	35	3.5%NaCl	72.8	87.2%
					BL－WOL	T－L	35	3.5%NaCl	71.4	100%
					BL－WOL	T－L	35	去离子水	60.1	87.2%

③ 去应力退火 一般在不高于时效温度的温度下加热，保温1～4 h，空冷。典型的去应力退火制度是510℃，2 h，空冷。

去应力退火可以在真空炉或空气炉中进行。空气炉中去应力退火后，由于TB6钛合金对吸氢较敏感，只能采用14:1的硝酸－氟化物溶液进行酸洗，酸洗后的单面基体金属去除量应不小于0.01 mm。

2）热变形工艺和性能

① 热变形温度下的拉伸性能见图7.4-25。

② 应变速率对流变应力的影响见图7.4-26。

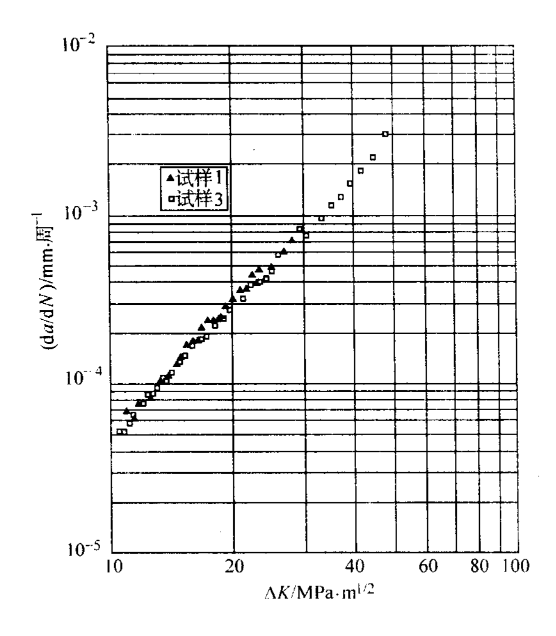


图 7.4-21　TB6 钛合金锻坯 $L-T$ 试样室温空气环境 $da/dN-\Delta K$ 曲线

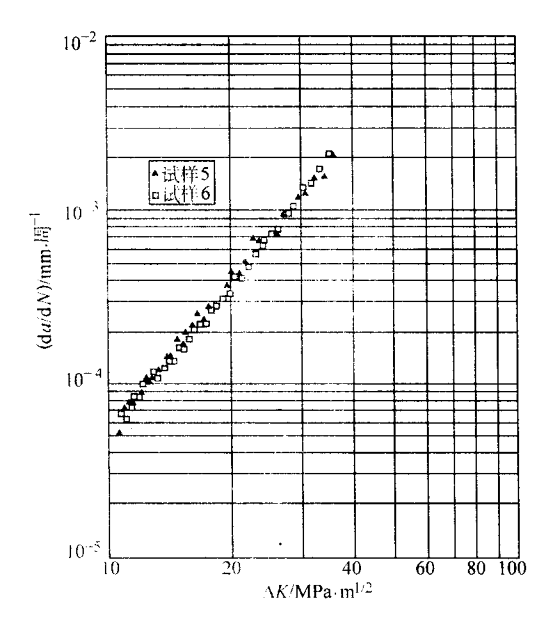


图 7.4-22　TB6 钛合金锻坯 $L-T$ 试样室温 3.5%NaCl 环境 $da/dN-\Delta K$ 曲线

③ 锻造温度对流变应力的影响见图 7.4-27。

④ 热变形工艺规范见表 7.4-149。

3）焊接工艺和性能

① TB6 钛合金可以采用适合于钛合金的各种焊接工艺进行焊接。TB6 钛合金的焊接性能与 TC4 钛合金相当。可以采用适合于 TC4 钛合金的工艺参数。

② TB6 钛合金电子束焊接后，基体金属和焊缝的典型拉伸性能和断裂韧性列于表 7.4-150。

4）表面处理工艺和性能

① 与 TB6 钛合金相接触的铝合金，必须进行阳极化处理。与 TB6 钛合金相接触的 30 CrMnSiA 等结构钢，应镀锌钝化后涂耐热漆，并在 TB6 钛合金和结构钢接触面之间夹垫绝缘胶布。

② 与 TB6 钛合金相接触的铝合金、结构钢经表面处理和涂漆后，由于装配需钻孔（铆钉孔、螺栓孔等）而造成原防护层破坏，因此在装配时对每一个孔必须涂相应的油漆，进行湿装配。

③ 为了防止钛合金表面污染和接触腐蚀，TB6 钛合金可以进行蓝色阳极化处理。TB6 钛合金进行蓝色阳极化处理后，可在零件表面生成一层均匀致密的蓝色或紫色薄膜，该薄膜非常有利于防止与其接触的金属腐蚀。

5）切削与磨削加工

① TB6 钛合金在溶固处理状态下的切削加工性能与 TC4 钛合金相似，但在固溶时效状态下的切削加工性能比 TC4 钛合金约低 40%。为此，TB6 钛合金在固溶处理状态下进行切削初加工，然后进行部分时效、精加工和最终时效。最后采用轻微的化学铣削或其他方法清理零件表面。

② 磨削加工可获得较高的表面精度，但磨削易烧伤零件，设计机械加工工艺时应尽量避免磨削工序。磨削时严禁产生火花或零件表面变色。

③ 钛合金攻丝很困难，特别是深孔攻丝，设计零件时应尽量避免。禁止采用砂轮干打磨，可以刮削、锉修或砂纸（Al_2O_3）打磨。

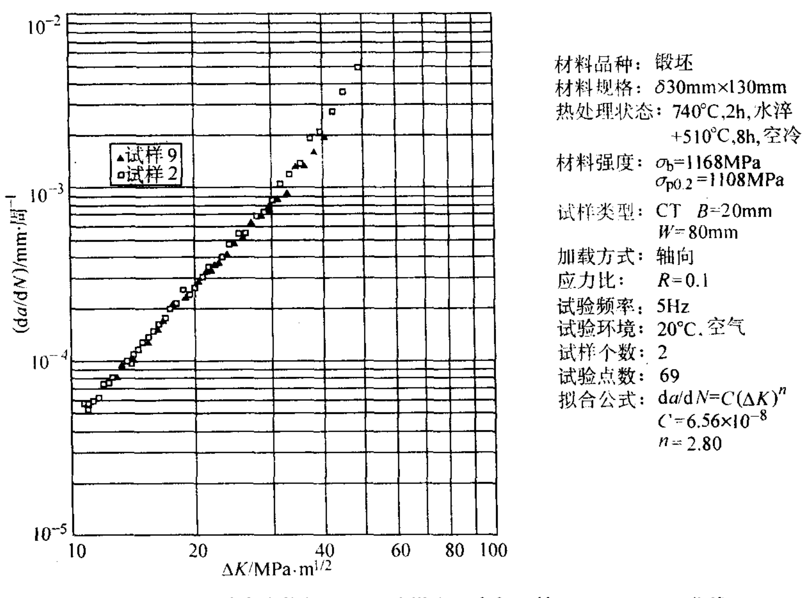


图7.4-23 TB6钛合金锻坯 $T-L$ 试样室温空气环境 $\mathrm{d}a/\mathrm{d}N-\Delta K$ 曲线

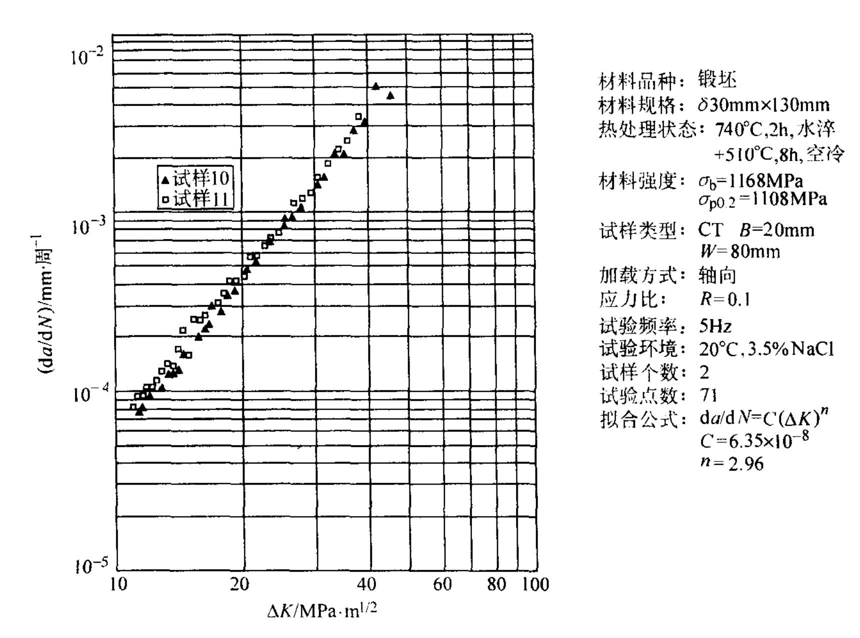


图7.4-24 TB6钛合金锻坯 $T-L$ 试样室温3.5%NaCl环境 $\mathrm{d}a/\mathrm{d}N-\Delta K$ 曲线

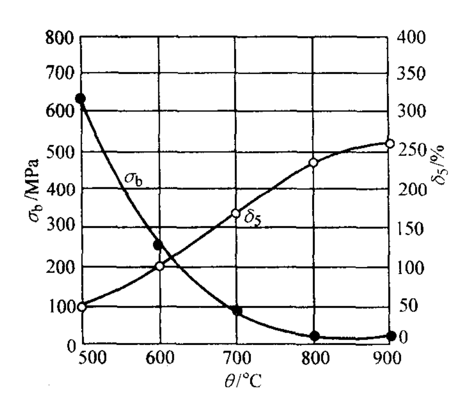


图7.4-25 TB6钛合金在热变形温度下的拉伸性能

4.6 选材及应用

1）航空航天工业中的应用 TB6钛合金由于具有最佳的强度、韧性和高周疲劳性能匹配，在航空航天工业中逐步获得广泛应用。TB6钛合金首先在波音757、A320、B-1B、

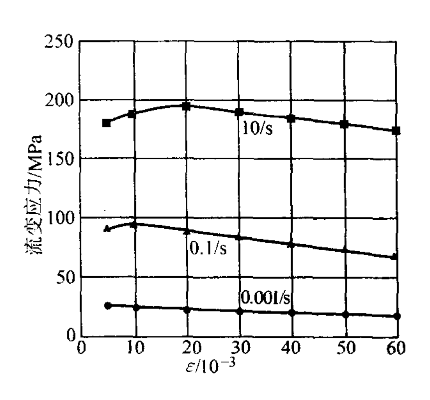


图7.4-26 应变速率对TB6钛合金流变应力的影响（锻造温度：815℃）

幻影2 000等民用及军用飞机上得到实际应用。然后，在波音777新型客机和超山猫多用途直升机上大量使用，才真正显示出TB6钛合金在航空航天工业应用中的巨大潜力。

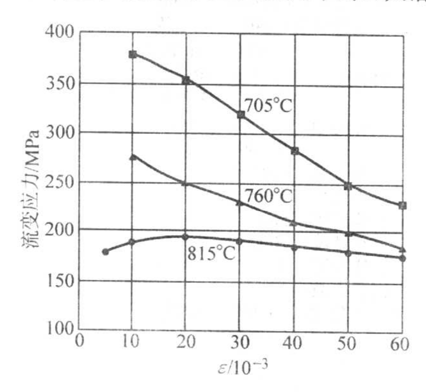


图7.4-27　锻造温度对TB6钛合金流变应力的影响（应变速率：10/s）

表7.4-149　TB6钛合金热变形工艺规范

热变形类型	加热温度/℃	终止温度/℃	每火变形量
铸锭开坯	1 100～1 150	800	β区50%～70%
棒材锻造	780～850	700	β区40%～60%，α+β区20%～40%
棒材轧制	780～820	680	β区50%～70%，α+β区30%～50%
荒坯锻造	780～840	700	β区40%～60%，α+β区20%～40%
锻锤模锻	780～800	680	β区40%～50%，α+β区25%～35%
等温模锻	760～780		α+β区30%～50%

表7.4-150　TB6钛合金电子束焊接后的典型力学性能

品种	厚板					
规格	δ＝19 mm					
状态	760℃，1 h，风扇空冷＋电子束焊接＋510℃，8 h，空冷					
取样部位	取样方向	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ/%	ψ/%	K_{IC}/ MPa·m$^{1/2}$
基体金属	L	1 281	1 210	5.0	7.9	—
焊缝	T	1 256	1 182	5.5	9.9	—
基体金属	T－L	—	—	—	—	57.7
焊缝	T－L	—	—	—	—	61.2
AMS 4984	T	≥1 193	≥1 103	≥4.0	—	≥44.0

图7.4-28是TB6钛合金在波音777主起落架上应用情况的示意图。除内外作动筒外，几乎整个主起落架都是用TB6钛合金制造的，使用的拉伸强度水平为1 195 MPa。采用TB6钛合金代替4340钢制造起落架后，每架飞机减小质量大约270 kg。起落架中最大的构件是转向架横梁，该零件长约3 m，直径约340 mm，曾经由三个锻件用电子束焊连接而成，后考虑到可靠性还是采用了整体锻件。

在波音777飞机用TB6钛合金制造的另外一些重要零件包括前起落架操纵机构和较大的襟翼导轨，这些导轨长度为1.3～1.6 m，减小质量约41 kg。TB6钛合金还用于制造货物装卸机构中的精密锻件和紧固件、型材等。

图7.4-29是TB6钛合金在韦斯特兰公司生产的超山猫多用途直升机上用于制造主旋翼桨毂等零件的情况。由于直升机最大起飞质量由3 860 kg提高到5 585 kg，原来采用的Ti－6Al－4V钛合金已经不能满足要求，必须采用强度更高、高周疲劳寿命更长和刚性较低的TB6钛合金，使用的拉伸强度水平为1 170 MPa。国际上许多直升机公司都选用TB6钛合金制造半刚性旋翼，其中包括桨毂、套筒、支座、旋翼轴、桨叶与轴的连接接头等零件。

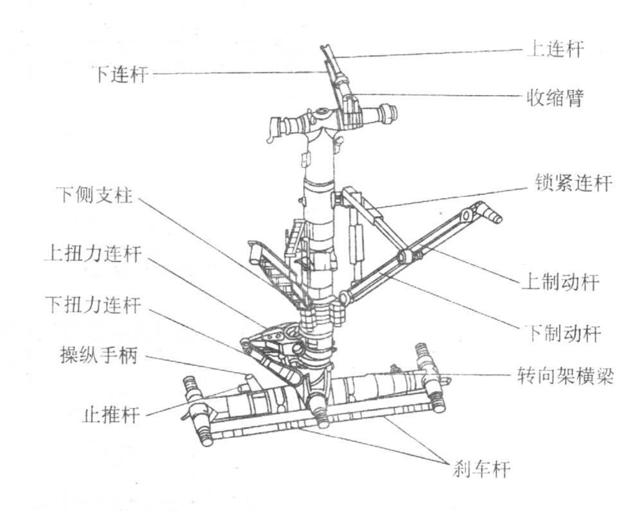


图7.4-28　TB6钛合金在波音777主起落架中的应用

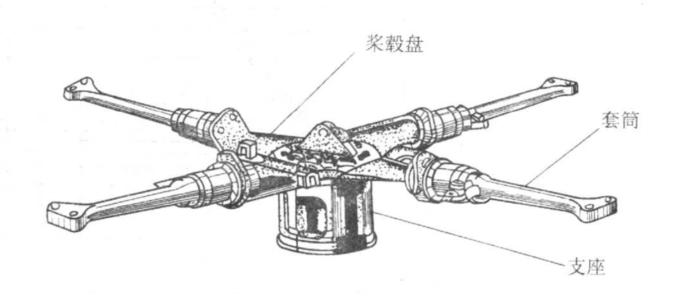


图7.4-29　TB6钛合金在超山猫直升机主旋翼中的应用

国内采用TB6钛合金研制成功的歼七－Ⅲ飞机后减速板梁、歼八－Ⅱ飞机58框腹鳍接头和强五接头等都达到了国外相应技术标准的要求，并顺利地通过了地面试验和空中试飞。

2）民用行业中的应用

TB6钛合金可以在汽车制造中用于要求较高强度的各种接头和传动装置。

3）特殊要求

① 针对不同零件的受力情况和工作条件，应该选择不同的强度和韧性水平匹配。例如，AMS4984规定$\sigma_b \geq 1\ 195$ MPa，$K_{IC} \geq 44$ MPa·m$^{1/2}$；AMS4986规定$\sigma_b \geq 1\ 105$ MPa，$K_{IC} \geq 60$ MPa·m$^{1/2}$；ASM4987规定$\sigma_b \geq 965$ MPa，$K_{IC} \geq 88$ MPa·m$^{1/2}$。

② TB6钛合金属于高强度钛合金，对应力集中比较敏感，表面加工状态对疲劳性能有明显的影响。零件的表面粗糙度R_a值不应高于3.2 μm，绞孔粗糙度R_a值不应高于1.6 μm，零件上的过渡半径应该是尽可能最大的。

③ 设计带孔的零件时，孔的边缘应有光滑的倒角。对于承受重复载荷的零件，受拉区应尽量减少钉孔，避免螺纹孔。对于多次受拉伸的螺栓及其他零件的螺纹部位应适当降低许用应力。

5 TB8 钛合金

TB8 钛合金的名义成分是 Ti - 15Mo - 3Al - 2.7Nb - 0.2Si，是一种介稳定的β型钛合金。该合金采用较多的 Mo 元素而不是 V，大大改善了合金的抗氧化性能和抗腐蚀性能，并具有与 TB5（Ti - 15 - 3）钛合金相似的较好的冷轧和冷成形性能。合金经时效后可达到很高的强度，且具有较好的焊接性能、高温抗氧化性能和耐腐蚀性能。因此该合金是一种较为理想的航空结构材料，如飞机液压系统、燃油箱、箔材用钛基复合材料的基体以及化工和石油加工工业。但是，由于合金中含有较多的 Mo、Nb 等β稳定元素，TB8 钛合金必须经过三次真空自耗电极电弧炉熔炼。

TB8 钛合金除了生产板材、带材外，也可生产箔材、丝材、管材、棒材和锻件。板材主要用于制造中等复杂程度的飞机冷成形钣金零件。可以代替强度水平相当于 30CrMnSiA 结构钢的零件及热成形的钛合金零件。TB8 钛合金板材及其零件可以在固溶处理状态和固溶时效状态下使用。通过不同的时效制度，可以实现不同强度和塑性的匹配，满足高结构效益、高可靠性的设计要求。TB8 钛合金固溶处理状态的使用温度为 200℃，固溶 + 冷成形 + 时效状态的最高使用温度为 550℃，固溶 + 冷成形状态的使用温度为 150℃。TB8 钛合金板材的三种不同强度和塑性（L_0 = 50 mm）的级别是：$\sigma_b \geq 860$ MPa，$\delta \geq 5\%$；$\sigma_b \geq 1\,015$ MPa，$\delta \geq 5\%$；$\sigma_b \geq 1\,200$ MPa，$\delta \geq 5\%$。

相近牌号：β - 21S（TIMETAL 21S）（美国）。

5.1 化学成分

Q/6S 1579—2000《固溶处理 TB8 钛合金薄板》、Q/6S 1580—2000《TB8 钛合金棒材和线材》标准规定的化学成分见表 7.4-151。

表 7.4-151　TB8 钛合金化学成分（质量分数）　%

主要元素					杂质元素≤						
Mo	Al	Nb	Si	Ti	Fe	O	C	N	H	其他元素 单个	其他元素 总量
14.0 ~ 16.0	2.5 ~ 3.5	2.4 ~ 3.2	0.15 ~ 0.25	余量	0.40	0.17	0.05	0.05	0.015	0.10	0.40

注：1. H 在供应状态下的板材或棒材上检验。
2. 其他元素（Cr，Sn，Zr，Cu，B，Y）在正常情况下可不做检验，当需方要求并在合同中注明时可予以检验。

5.2 物理性能

1）密度 $\rho = 4.93$ g/cm³。

2）热导率见表 7.4-152。

表 7.4-152　热导率（STA）

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
λ/W·m⁻¹·K⁻¹	6.7	7.5	9.2	10.3	10.8	12.4	13.8

3）比热容见表 7.4-153。

表 7.4-153　比热容（STA）

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
c/J·kg⁻¹·K⁻¹	486	497	542	545	553	569	600

4）线胀系数见表 7.4-154。

表 7.4-154　线胀系数（STA）

θ/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400	20 ~ 500	20 ~ 600
α/10⁻⁶K⁻¹	8.1	8.8	9.1	9.4	9.5	9.9

5）电阻率见表 7.4-155。

表 7.4-155　电阻率（STA）

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
ρ/μΩ·m	1.346	1.386	1.430	1.469	1.489	1.526	1.542

6）磁性能　无磁性。

7）抗氧化性能　不同温度下 TB8 钛合金氧化增重见表 7.4-156。不同合金的氧化性能对比见图 7.4-30，抗氧化性能是工业纯钛的十倍。

表 7.4-156　TB8 钛合金不同温度下氧化 100 h 后的增重

试验温度/℃	增重/mg·cm⁻²
400	0.08
600	0.25
700	1.01
800	2.92

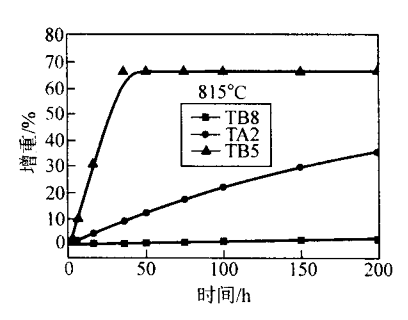


图 7.4-30　几种钛合金的高温抗氧化性能比较

8）耐腐蚀性能　与工业纯钛相近，特别能耐热油腐蚀，故适合于应用在发动机附近的结构件零件。

5.3 相变及显微组织

1）相变温度　α + β↔β 相转变温度为 815 ~ 820℃。

2）显微组织

TB8 钛合金经β固溶后空冷或更快速度冷却后的室温组织为亚稳定β单相组织，偶尔在水冷的组织中发现非等温ω相和少量的 Ti_5Si_3 相。不同温度时效相变过程与时效温度和时间有关，在 450℃以上温度时效，β基体中只有α相析出，即只发生 β↔β + α 的转变，最终形成 α + β 两相组织。大约在低于 400℃时效，β基体中先析出过渡相等温ω相，随时效时间的继续延长，合金中析出α相，发生 β→β + ω + α 转变。在 200℃以下时效，由于温度太低，合金元素扩散难以进行，无相变发生。合金在 750 ~ 800℃以上温度时效时，相变析出α相所需的孕育时间加长，相变进行的速度减慢。

3）再结晶温度

再结晶开始温度随冷轧变形量增加而降低。例如，当冷轧变形 15%左右时，再结晶开始温度为 810℃左右，接近合金的相变点；而当冷轧变形量增加到 60%时，在相变点以下 40℃即 775℃左右就开始再结晶。

5.4 力学性能

1）技术标准规定的性能见表 7.4-157 和表 7.4-158。

表 7.4-157 技术标准规定的 TB8 钛合金板材性能

技术标准	品种	状态	δ/mm	取样方向	室温				高温②		
					σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ①/%	α/(°)	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ①/%
						≥					
Q/6S 1579—2000 XJ/BS 5166—2000	板材（带材）	固溶	0.3~0.6	LT	825~1 000	795~965	6	—	—	—	—
			>0.6~2.5	L	825~1 000	795~965	8	—	—	—	—
		固溶时效1③	0.3~0.6	LT	≥1 015	≥950	≥4		≥655	≥520	≥15
				L	≥995	≥940	≥4		≥655	≥520	≥15
			>0.6~2.5	LT	≥1 015	≥950	≥5		≥655	≥520	≥15
				L	≥995	≥940	≥5		≥655	≥520	≥15
		固溶时效2④	0.3~0.6	LT	≥860	≥795	≥5		≥415	≥340	≥17
				L	≥860	≥795	≥6		≥415	≥340	≥17
			>0.6~2.5	LT	≥860	≥795	≥5		≥415	≥340	≥17
				L	≥860	≥795	≥6		≥415	≥340	≥17

① δ 值对板材或带材为 $L_0 = 50$ mm 定标距延伸率。
② 对固溶时效 1 的板材高温性能测试温度为 480±3℃，对固溶时效 2 的板材高温性能测试温度为 595±3℃，高温性能报实测数据，暂不作考核依据。
③ 固溶时效 1 的热处理制度为：固溶 + 595℃ ±6℃/8 h±0.5 h，AC 或 FC。
④ 固溶时效 2 的热处理制度为：(a) 固溶 + 690℃ ±6℃/8 h±0.5 h，AC 或 FC + 650℃ ±6℃/8 h±0.5 h，AC 或 FC；或 (b) 固溶 + (660~680)℃ ±6℃/8 h±0.5 h，FC。

表 7.4-158 技术标准规定的 TB8 钛合金棒材和锻件性能

技术标准	品种	状态	δ 或 d/mm	取样方向	室温				
					σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	K_{IC}②/MPa·m$^{1/2}$
						≥			
Q/6S 1580—2000 XJ/BS 5165—2000	线材①	固溶	4.0~6.0	L	825~1 000	—	≥12	≥35	—
	棒材	固溶时效	10~70	L	≥1 250	≥1 105	≥8	≥15	—
			>75~100	L	≥1 250	≥1 105	≥8	≥15	—
				T	≥1 250	≥1 105	≥6	≥10	—
				C-R	—	—	—	—	≥60
			>100~180 或镦饼	T	≥1 250	≥1 105	≥6	≥10	—
				C-R	—	—	—	—	≥60
Q/6S 1578—2000	锻件	固溶时效	≤100	L	≥1 250	≥1 105	≥8	≥15	—
				T	≥1 250	≥1 105	≥6（模锻件） ≥5（自由锻件）	≥10	—
				T-L	—	—	—	—	≥60

① 直径 4~6 mm 线材当需方要求时，供方应提供固溶状态剪切强度实测值。提供直径 4~6 mm 线材时效状态的室温接伸性能实测值。
② 断裂韧度报实测数据，暂不作为报废依据。

2）室温及各种温度下的力学性能

① 硬度　锻件固溶时效状态的室温硬度 352~373HB，平均为 361HB。

② 接伸性能　各种温度下的拉伸性能见表 7.4-159 和表 7.4-160。不同固溶、时效方式对合金板材力学性能的影响见表 7.4-161。

③ 低温拉伸性能见表 7.4-162。

④ 室温压缩性能见表 7.4-163。

⑤ 冲击性能　不同温度冲击韧度见表 7.4-164。

表 7.4-159 TB8 钛合金板材各种温度下的拉伸性能

品种	板材
δ/mm	1.2 mm
取向	LT

续表 7.4-159

品种	板材							
状态	试验温度/℃	不同温度拉伸性能						
		E/GPa	$\sigma_{p0.01}$/MPa	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	$\sigma_{0.7}$/MPa	$\sigma_{0.85}$/MPa	δ_{50}/%
固溶（845℃/10 min，AC）	20	70	465	860	847	857	849	10.4
	100	69	410	675	659	—	—	15.0
	200	69	399	607	590	593	583	15.1
	300	66	366	582	539	554	529	12.0
固溶时效（STOA）（845℃/10 min，AC＋690℃/8 h，AC＋650℃/8 h，AC）	20	97	709	921	847	930	909	11.8
	200	—	—	834	746	758	736	9.3
	300	91	563	791	687	701	674	9.6
	400	—	—	719	611	625	599	8.4
	500	83	419	686	595	613	578	9.4
	550	—	—	612	514	532	490	12.5
	600	—	—	496	349	496	244	22.6
固溶时效（845℃/10 min，AC＋680℃/8h，FC）	20	99	755	1 165	1 070	1 106	1 063	13.0
	200	96.4	659	1 115	1 020	1 045	1 018	7.6
	300	94.5	608	1 025	924	949	916	7.5
	400	91.4	541	968	848	879	839	5.9
	500	82.3	467	831	718	749	700	8.1
	550	70.0	400	743	604	645	570	13.5
	600	65.8	190	580	370	387	299	20.5

表 7.4-160　不同温度棒材和锻件拉伸性能

品种	状态	δ 或 d/mm	取向	试验温度/℃	不同温度拉伸性能						
					$\sigma_{p0.01}$ MPa	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	$\sigma_{0.7}$/MPa	$\sigma_{0.85}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
棒材	固溶	16	L	20	—	917	911	—	—	17.3	64.7
棒材	固溶时效	16	L	20	1 024	1 359	1 206	1 309	1 284	14.0	56.2
				200	787	1 175	1 080	1 116	1 076	13.9	64.7
				300	821	1 106	1 007	1 046	1 007	12.7	63.3
				400	854	1 103	1 019	1 063	1 019	12.7	64.9
				450	727	1 070	970	1 024	970	13.6	67.2
锻件	固溶	50	L	20	—	960	935	—	—	18.5	62.0
	固溶时效	50	L	20	788	1 271	1 228	1 241	1 245	9.0	37.0
				300	821	1 068	978	1 009	974	9.8	48.6
				400	770	1 056	957	996	954	8.7	53.7

表 7.4-161　不同固溶、时效方式对合金板材力学性能的影响

品种	状态	δ/mm	取向	室温拉伸性能		
				δ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_{50}/%
板材	空气固溶	1.2	LT	871	841	10.8
	真空固溶			863	829	10.2
	空气固溶时效			1 154	1 095	8.8
	真空固溶＋真空时效			1 095	1 043	10.9

表 7.4-162　低温拉伸性能

品种	状态	δ 或 d/mm	取向	热处理制度	试验温度/℃	σ_b/MPa	δ_{50} 或 δ_5/%
板材	固溶时效	1.5	LT	ST＋540℃，8 h，AC	－70	1 390	9.8
				ST＋680℃，8 h，FC		1 250	10.5
棒材	固溶时效	16		800℃/1.5 h，AC＋560℃/8 h，AC		1 359	14.0

表 7.4-163　室温压缩性能

品种	状态	δ 或 d/mm	取向	$\sigma_{-0.2}$/MPa
板材	固溶（ST：845℃，10 min，AC）	1.5	LT	856
	固溶时效（ST＋540℃，8 h，AC）			1 484
	固溶时效（ST＋680℃，8 h，FC）			989
棒材	固溶时效（800℃，1.5 h，AC＋560℃，8 h，AC）	20	L	1 196

表 7.4-164　TB8 钛合金不同温度冲击韧度

品种	状态	d/mm	取样方向	温度/℃	a_{KU}/J·cm^{-2}
棒材	固溶时效	20	L	20	33
				200	63
				300	91
				400	117

⑥ 室温承载性能见表 7.4-165。

表 7.4-165　室温承载性能

品种	状态/热处理制度	δ/mm	取向	e/D	σ_{bru}/MPa	σ_{bry}/MPa
板材	固溶（845℃，10 min，AC）	1.5	LT	1.5	1 653	1 530
				2.0	2 006	1 642
	固溶时效（845℃，10 min，AC＋680℃，8 h，FC）			1.5	1 781	1 555
				2.0	2 282	1 910
	固溶时效（845℃，10 min，AC＋690℃，8 h，AC＋650℃，8 h，AC）			2.0	2 009	1 594
	固溶时效（845℃，10 min，AC＋540℃，8 h，AC）			1.5	1 735	—
				2.0	1 845	—

⑦ 应力集中性能见表 7.4-166。

⑧ 扭转和剪切性能　棒材的扭转和剪切性能见表 7.4-167。

⑨ 热稳定性能见表 7.4-168 和表 7.4-169。

表 7.4-166 板材和棒材应力集中性能

品种	状态/热处理制度	δ或d/mm	取向	试验温度℃	缺口敏感系数			
					$K_t=3$, $r=0.75$		$K_t=5$, $r=0.23$	
					σ_{bH} /MPa	σ_{bH}/σ_b	σ_{bH} /MPa	σ_{bH}/σ_b
板材	固溶时效 (ST+680℃, 8 h, FC)	1.2	LT	20	1 386	1.19	1 293	1.11
				200	1 316	1.18	1 282	1.15
				300	1 179	1.15	1 189	1.16
				400	1 113	1.15	1 104	1.14
				500	964	1.16	947	1.14
棒材	固溶时效 (800℃,1.5 h, AC +560℃,8 h, AC)	16	L	-70	1 880	1.39	—	—
				20	1 862	1.38	1 856	1.40
				100	1 807	1.41	1 831	1.43
				200	1 754	1.45	1 738	1.45
				300	1 676	1.51	1 665	1.45
				400	1 603	1.47	1 592	1.45
				500	1 511	1.59	1 516	1.55

表 7.4-167 TB8 钛合金棒材的扭转和剪切性能

品种	d/mm	状态/热处理制度	温度/℃	τ_b /MPa	$\tau_{p0.3}$ /MPa	$\tau_{0.015}$ /MPa	G /GPa
棒材	20	800℃, 1.5 h, WQ +570℃, 8 h, AC	20	998	810	654	41.5
			300	815	644	504	39.2
			400	774	621	467	37.2

表 7.4-168 TB8 钛合金板材热暴露后的室温力学性能

品种	δ /mm	取向	状态/热处理制度	试样热暴露条件	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_{50} /%
板材	0.3	LT	固溶时效: 845℃, 10 min, AC +670℃, 8 h, FC (真空)	未暴露	1 052	1 059	7.8
				550℃/50 h	1 087	1 049	8.3
				400℃/100 h	1 110	1 080	6.0
				300℃/500 h	1 034	964	10.3
				300℃/1 000 h	1 014	968	10.4
				300℃/3 000 h	1 043	—	7.6
	1.2	LT	固溶时效: 845℃, 10 min, AC +690℃, 8 h, AC +650℃, 8 h, AC	未暴露	938	911	11.9
				550℃/100 h	1 015	972	9.5
				550℃/300 h	975	949	9.3
				400℃/500 h	1 045	992	7.7
			固溶时效: 845℃, 10 min, AC +670℃, 8 h, FC	未暴露	1 049	987	10.1
				550℃/300 h	1 081	1 061	7.6
				400℃/500 h	1 114	1 062	7.1
			固溶时效: 845℃, 10 min, AC +680℃, 8 h, FC	未暴露	974	922	13.0
				550℃/300 h	1 035	1 010	8.7
				400℃/500 h	1 121	1 033	7.0
				300℃/1 000 h	1 048	1 006	11.0

表 7.4-169 TB8 钛合金棒材热暴露后的室温力学性能

品种	d/mm	取向	状态/热处理制度	试样热暴露条件	室温拉伸性能			
					σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ/%
棒材	16	L	固溶时效: 800℃, 1.5 h, AC +560℃, 8 h, AC	原始态	1 359	1 206	14.0	56.2
				300℃/500 h	1 315	1 259	12.1	47.0
				400℃/500 h	1 353	1 270	13.3	47.5

3）持久和蠕变性能见表 7.4-170。

表 7.4-170 TB8 钛合金高温持久和蠕变性能

品种	δ/mm	取向	状态	θ/℃	σ_{100} /MPa	$\sigma_{0.2/100}$ /MPa
板材	1.2	LT	固溶时效 (845℃, 10 min, AC+595℃, 8 h, AC)	400	920	—
			固溶时效 (845℃,10 min,AC+690℃,8 h, AC +650℃,8 h,AC)	550	235	—
				400	710	435
			固溶时效 (845℃, 10 min, AC+680℃, 8 h, FC)	550	231	—
				400	796	570
棒材	16	L	固溶时效 (800℃, 1.5h, AC+560℃, 8 h, AC)	300	—	950
				350	1 070	—
				400	—	580

4）疲劳性能 TB8 钛合金板材、棒材和锻件室温轴向加载疲劳强度极限见表 7.4-171。

表 7.4-171 室温轴向加载疲劳强度极限

品种	δ或d/mm	状态/热处理制度	取向	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	K_t	R	f/Hz	N /周	σ_D /MPa
板材	1.5	固溶时效 ST+540℃,8 h, AC	LT	1 350	1 290	1	0.1	116	10^7	625
						3	0.1	116	10^7	271
		固溶时效 ST+680℃,8 h, FC	LT	1 050	987	1	0.1	116	10^7	658
						3	0.1	116	10^7	252
棒材	16	固溶时效 800℃,1.5 h,AC+560℃,8 h,AC	L	1 355	1 315	1	0.1	97	10^7	628
						3	0.1	99	10^7	271
锻件	50	固溶时效 800℃,1.5 h,WQ+570℃,8 h,AC	L	1 265	1 225	1	0.1	116	10^7	673
						3	0.1	116	10^7	306

5）弹性性能

① 弹性模量 TB8 钛合金板材经固溶时效状态的动态弹性模量 E_D 见表 7.4-172。

表 7.4-172 弹性模量、切变模量、泊松比

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
E_D/GPa	111.2	109.3	105.5	101.9	98.6	94.0	88.9
G/GPa	43.6	42.7	41.3	39.8	37.9	36.0	34.0
μ	0.28	0.28	0.28	0.28	0.30	0.31	0.31

不同热处理状态下的压缩弹性模量见表 7.4-173。

表 7.4-173 室温压缩性能

品种	状态	δ 或 d/mm	取向	E_c/GPa
板材	固溶（ST+845℃，10 min，AC）	1.5	LT	72
	固溶时效（ST+540℃，8 h，AC）			107
	固溶时效（ST+680℃，8 h，FC）			103
棒材	固溶时效（800℃，1.5 h，AC+560℃，8 h，AC）	20	L	101

棒材和锻件不同温度下的拉伸弹性模量见表 7.4-174。

表 7.4-174 不同温度下的弹性模量 *E* 值

品种	δ 或 d/mm	状态	θ/℃							
			20	100	200	300	400	450	500	600
棒材	16	固溶时效	104	—	102	91	88	86	—	—
锻件	50		106	—	—	94	89	—	—	—
板材	1.2	固溶	70	69	69	66				
		固溶时效	97			91			83	

② 切变模量　不同温度的切变模量见表 7.4-175。

表 7.4-175 切变模量

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
G/GPa	43.6	42.7	41.3	39.8	37.9	36.0	34.0

③ 泊松比　不同温度的泊松比见表 7.4-176。

表 7.4-176 泊松比

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
μ	0.28	0.28	0.28	0.28	0.30	0.31	0.31

6）锻裂性能

① 断裂韧性　锻坯、自由锻件和模锻件的断裂韧性见表 7.4-177。

表 7.4-177 锻坯、自由锻件和模锻件的断裂韧性

品种	状态/热处理制度	δ /mm	试样类型	取样方向	K_{IC} /MPa·m$^{1/2}$	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa
锻坯	固溶时效 800℃，1.5 h，AC+560℃，8 h，AC	30×130	紧凑拉伸	T-L	58.6	1 269	1 216
自由锻件	固溶时效 800℃，1.5 h，WQ+570℃，8 h，AC	30		T-L	65.5	1 265	1 224
模锻件	固溶时效 800℃，1.5 h，WQ+570℃，8 h，AC	30		T-L	62.0	1 280	1 235

② 疲劳裂纹扩展速率　时效状态板坯的 $da/dN-\Delta K$ 曲线见图 7.4-31。锻件的 $da/dN-\Delta K$ 曲线见图 7.4-32 所示。

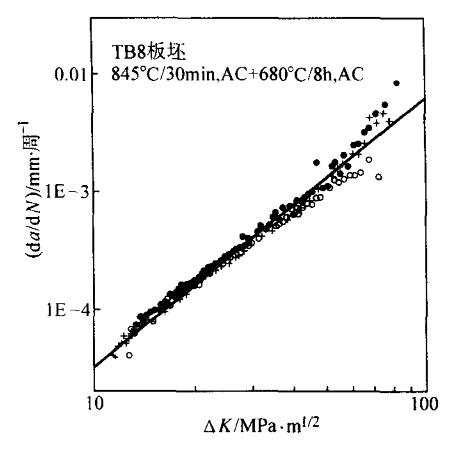


图 7.4-31 680℃/8 h，FC 时效状态板坯的 da/dN-ΔK 曲线（T-L）

材料品种：板坯　　试样类型：CT 型 B=10 mm W=40 mm

材料规格：厚度 25 mm　　加载方式：轴向

热处理状态：845℃，30 min，空冷+680℃，8 h，FC　　应力比：0.1

材料强度：σ_b=1 050 MPa，$\sigma_{0.2}$=988 MPa　　试验频率：10 Hz

取样方向：T-L　　试验环境：20℃空气

试样数量：3　　试验点数：231

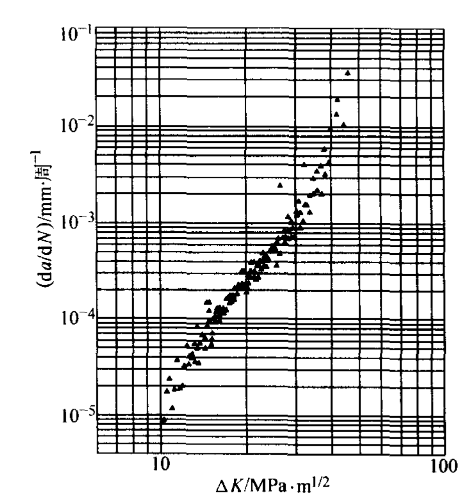


图 7.4-32 锻件的 da/dN-ΔK 曲线（T-L）

5.5 制造工艺和性能

1）热处理工艺和性能

① 固溶处理　板材和板材零件：815～900℃，3～30 min，以空冷或更快的速度冷却；

棒材和锻件：755～805℃，0.5～2 h，水淬（对于直径或厚度小于或等于 25 mm 的半成品允许采用空冷代替水淬）。

线材或丝材：745～815℃，0.5～2 h，水淬或空冷。

② 时效

（Ⅰ）板材和板材零件

时效处理制度可以根据强度水平要求来确定。以下是三个强度水平的时效处理制度：

（ⅰ）1 200 MPa 强度等级：在 540～560℃范围内选定时效温度，温度波动范围为 ±6℃，保温 8 h±0.5 h 后空冷或炉冷。

（ⅱ）1 015 MPa强度等级：在580～600℃范围内选定时效温度，温度波动范围为±6℃，保温8 h±0.5 h后空冷或炉冷。

（ⅲ）860 MPa强度等级且有高温性能要求时可采用以下两种制度之一：

a）单一时效　在660～680℃范围内选定时效温度，温度波动范围为±6℃，保温8 h±0.5 h后炉冷。

b）双重时效　第一级时效选择690±6℃，保温8 h±0.5 h后空冷，第二级时效选择650℃±6℃，保温8 h±0.5 h后空冷。

（Ⅱ）棒材和锻件

棒材：500～640℃，8～10 h，空冷。

锻件：540～600℃，8 h±0.5 h，空冷。

2）TB8钛合金锻棒在热变形温度下的拉伸性能见图7.4-33所示。

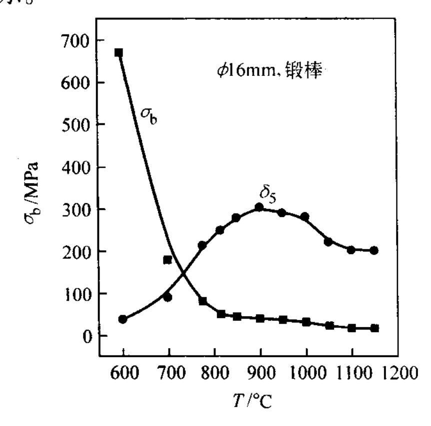


图7.4-33　TB8钛合金锻棒在热变形温度下的拉伸性能

3）冲压成形工艺性能

① 冲压成形工艺性能见表7.4-178。

表7.4-178　板材的杯突、拉深、翻边、扩孔性能

材料	δ/mm	热处理状态	杯突值/mm	极限拉深比LDR	极限翻边系数	扩孔率/%
TB8	0.8	845℃，10 min，AC	10.19	1.75	0.71	33.5
	0.3		7.16	—	—	—

② 板材冲压成形性能　在冷态下可成形较复杂零件而不用中间退火。TB8板材的杯突值与尺寸因素有关，材料越薄，杯突值越低。就同样厚度比较TB8钛合金板材的杯突性能比Ti-15-3钛合金、工业纯钛TA1和TA2高。TB8板材的拉深性能和扩孔性能也与工业纯钛TA1和TA2合金相当。

4）焊接工艺性能

① 板材点焊接头力学性能见表7.4-179。

表7.4-179　TB8钛合金不同热处理状态下的点焊接头力学性能

δ/mm	热处理状态焊前/焊后	焊接电流/A	电极压力/N	焊接时间/s	熔核直径/mm	单点剪切力/kN·点$^{-1}$	断裂形式
0.35+0.35	ST+RW+A	3 940	1 780	0.08	$\frac{2.8\sim2.9}{2.9}$	$\frac{2.344\sim2.520}{2.376}$	撕破
	STA+RW	4 060			$\frac{2.7\sim2.8}{2.8}$	$\frac{1.798\sim2.047}{1.947}$	
1.5+1.5	ST+RW+A	7 920	4 510	0.16	$\frac{5.4\sim5.8}{5.6}$	$\frac{15.09\sim16.98}{15.77}$	剪切
	STA+RW	8 130			$\frac{5.2\sim6.0}{5.7}$	$\frac{18.54\sim19.61}{18.82}$	

② 缝焊工艺规范及性能见表7.4-180。

表7.4-180　缝焊工艺规范及性能测试结果

δ/mm	热处理状态焊前/焊后	焊接电流/A	电极压力/N	焊接时间（脉冲/间隙）/s	焊缝宽度/mm	接头强度/MPa	断裂部位
0.35+0.35	ST/A	4 000	2 170	0.06/0.10	$\frac{2.9\sim3.1}{3.0}$	$\frac{934\sim1\,001}{978}$	熔合线或基体
	STA/未处理				$\frac{2.9\sim3.1}{3.0}$	$\frac{895\sim1\,000}{932}$	
1.5+1.5	ST/A	8 800	5 110	0.06/0.16	$\frac{5.4\sim5.7}{5.6}$	$\frac{971\sim1\,013}{1\,004}$	热影响区
	STA/未处理	8 200			$\frac{5.4\sim5.7}{5.6}$	$\frac{708\sim756}{745}$	熔合线

注：焊接速度：当厚度为0.35 mm+0.35 mm时为630 mm/min；当厚度为1.5 mm+1.5 mm时为460 mm/min。

③ 手工氩弧焊接头力学性能见表7.4-181。

表7.4-181　板材手工氩弧焊焊接接头力学性能

δ/mm	试样序号	取向	热处理状态焊前/焊后	σ_b/MPa	δ_5/%	断裂位置	备注
2	011	LT	STA+TIG	993	7.0	HAZ	
	012			990	7.8	HAZ	
	013			996	7.8	HAZ	
	014			952	7.9	HAZ	磨去余高
	021			984	9.0	BM（基体）	
	022			997	6.1	HAZ	
	023			1 009	6.1	近缝区	
	024			981	6.9	HAZ	磨去余高
	11	LT	ST+TIG	938	13.1	HAZ	
	12			940	11.5	HAZ	
	13			941	11.5	BM	
	14			930	10.3	HAZ	磨去余高
	21		ST+TIG+A	1 042	9.4	BM	
	22			1 058	10.5	HAZ	
	23			1 058	11.1	HAZ	
	24			1 033	11.5	HAZ	磨去余高

④ 电子束焊接头力学性能　板坯焊接接头室温力学性能见表7.4-182。接头室温冲击性能见表7.4-183。接头室温剪切性能见表7.4-184。接头的轴向加载室温疲劳性能见表7.4-185。

表7.4-182　板坯焊接接头室温力学性能

δ/mm	取向	状态	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%	断裂位置
50	LT	固溶+焊接	$\frac{914\sim938}{922}$	$\frac{948\sim962}{952}$	$\frac{5.2\sim10.0}{6.5}$	$\frac{11.2\sim26.8}{18.0}$	近缝区
		固溶+焊接+时效	—	$\frac{1\,283\sim1\,302}{1\,298}$	$\frac{4.0\sim7.8}{4.8}$	$\frac{8.2\sim15.7}{12.7}$	基体和热影响区
		固溶+时效+焊接	$\frac{920\sim930}{925}$	$\frac{920\sim950}{940}$	$\frac{3.0\sim7.5}{5.3}$	$\frac{8.0\sim18.0}{11.0}$	焊缝
		母材固溶+时效	$\frac{1\,190\sim1\,260}{1\,225}$	$\frac{1\,235\sim1\,340}{1\,300}$	$\frac{6.5\sim12.0}{9.6}$	$\frac{15.0\sim43.0}{20.0}$	—

表 7.4-183　接头室温冲击性能

δ/mm	取向	热处理状态	缺口部位	α_k/J·cm^{-2}
50 mm	LT	800℃/1.5 h，WQ + EBW + 570℃/8 h，AC	焊缝	11.4
			热影响区	11.7

表 7.4-184　接头的剪切性能

δ/mm	取向	热处理状态	试验温度	τ/MPa
50	LT	800℃/1.5 h，WQ + EBW + 570℃/8 h，AC	20℃	$\frac{748\sim816}{788}$

表 7.4-185　电子束焊接接头的疲劳性能

方法	σ_{max}/MPa	寿命 N/千周	备注
$K_t=1$　$R=0.1$　$f=140$			
成组法	670	247	
	610	56	
	550	70	
	510	439	
升降法	490	7 859	指定寿命 $N=10^7$ $\sigma_D=464$ MPa
	470	3 934，85，>10 030，470，7 635	
	450	>10 030，>10 030，>10 030，>10 030	
$K_t=3$　$R=0.1$　$f=130$			
成组法	400	84	
升降法	370	37	指定寿命 $N=10^7$ $\sigma_D=341$ MPa
	355	>10 030，74，61	
	340	>10 030，1 844，83，126，285	
	325	>10 030，>10 030，>10 030，>10 030	

5.6　选材及应用

TB8 钛合金具有与 TB5 钛合金相似的冷轧和冷成形能力，除生产板材、带材外，也可生产箔材、丝材和管材。可通过时效获得广泛的强度范围，与其他钛合金比较还具有以下几个优点：①在较高的强度下仍保持强度、塑性的良好匹配；②冷、热加工性能优良，冷变形 75%以上，不需中间退火；③高温性能良好，可在 550℃下长期工作；④抗氧化性能优良，其抗氧化性能是工业纯钛的 10 倍，是 TB5 合金的 100 倍；⑤该合金是第一个能耐热液压油腐蚀的高强度钛合金，因而可以用于发动机舱这种可能被液压油污染的地方。利用它的高温性能，可望用于涡轮发动机高于 425℃的结构部件；利用其抗氧化性，可用于高温导管和压力管线。另外，该合金焊接性能优良，可以用适合于钛合金的任何方法进行焊接；该合金与复合材料间的热膨胀系数相容性也比复合材料与铝的相容性更好，可作金属基复合材料的主要基体。

采用 TB8 钛合金板材代替 1Cr18Ni9Ti 不锈钢板材在某系列飞机上制造后机身导风罩零件（图 7.4-34）及配套的紧固件（图 7.4-35），实现减重 37.6%，和采用 TB8 钛合金棒材代替 30CrMnSiA 结构钢在某系列飞机上制造后机身 65 框三个锻件的焊接组合件（图 7.4-36），实现减重 17%以上，大大提高现役飞机的结构效益。

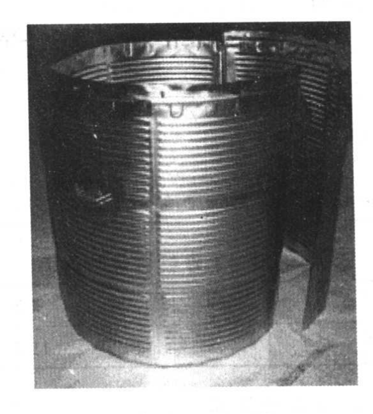


图 7.4-34　采用 0.3 mm 薄板制造的某系列飞机后机身导风罩零件



图 7.4-35　采用 TB8 超高强度钛合金丝材研制的某飞机后机身用螺栓螺钉紧固件

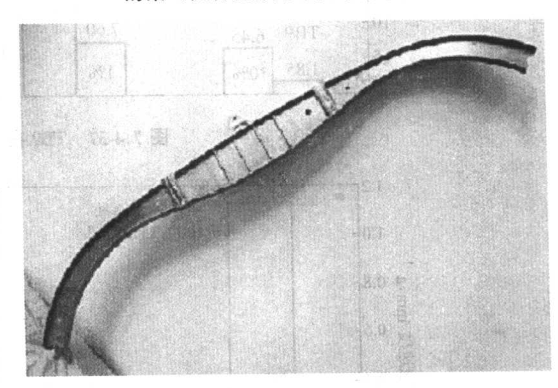


图 7.4-36　采用 φ165 mm 棒材制造的某飞机后机身 65 框（电子束焊接组合件）

6　TB9 钛合金

TB9 合金是一种高合金化的亚稳 β 型钛合金，其名义成分为 Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr。该合金中的 β 稳定元素含量很大，合金中的钼当量接近 20。因此，它可进行多种热处理，即通过改变热处理规范使合金得到不同的强度－塑性的配合。TB9 合金具有塑性好、强度和弹性高、淬透性好的优点，其淬透截面可达到 225 mm。由于该合金中的 Mo 含量相当高，因而具有优良的耐蚀性和抗盐应力腐蚀等性能。在舰船和海洋工程中得到了广泛的应用。TB9 钛合金具有很好的

加工性能，其主要半成品有棒材、锻件、板材等。

相近牌号：Ti－38644 或 β_C（美）

6.1　化学成分

Q/BS－规定的化学成分见表 7.4-186。

6.2　物理及化学性能

1）密度 $\rho = 4.82\ g/cm^3$。

2）熔化温度 1 650℃。

3）热导率　室温热导率见表 7.4-187。

表 7.4-186　TB9 钛合金化学成分（质量分数）　%

合金元素						杂质≤							
Ti	Al	V	Cr	Mo	Zr	Fe	Si	C	N	H	O	其他元素	
												单个	总和
基	3.0～4.0	7.5～8.5	5.5～6.5	3.5～4.5	3.5～4.5	0.3	0.10	0.05	0.03	0.015	0.12	0.10	0.40

表 7.4-187　TB9 钛合金热导率

θ/℃	20	100	200	300	400
$\lambda/W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	6.2	7.5	8.9	11.2	14.3

4）比热容　室温比热容为 515J/（kg·K）。

5）线胀系数　室温线胀系数为 8.3×10^{-6}/℃，其他温度的线胀系数见表 7.4-188。

表 7.4-188　TB9 钛合金线胀系数

θ/℃	20～100	20～200	20～300	20～400	20～500	20～600
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	8.7	9.2	9.35	9.55	9.60	9.62

6）磁性　无磁性。

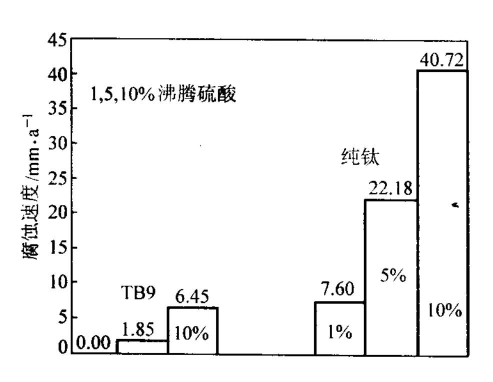
7）电阻率见表 7.4-189。

表 7.4-189　TB9 钛合金电阻率

θ/℃	20	100	200	300	400
$\rho/\mu\Omega\cdot m$	1.6	1.59	1.55	1.52	1.50

8）耐蚀性能

① 均匀腐蚀　由于 Mo 的加入，改善了钛在还原性介质中的耐腐蚀性能。此结果可由 TB9 在诸如 HCl 和 H_2SO_4 等的还原性介质中的腐蚀率得以证明（如图 7.4-37 所示）。在还原性介质中耐蚀性提高，然而，在诸如 HNO_3 之类氧化性介质中，耐蚀性降低（如图 7.4-38 所示）。在 H_2SO_4 中，若存在氧化介质，比如 $FeCl_3$，则对耐蚀性不利。TB9 在特定介质中的腐蚀率见表 7.4-190。



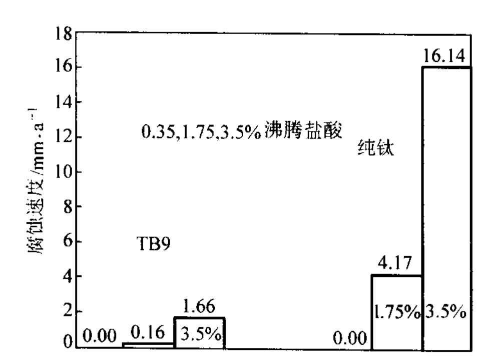
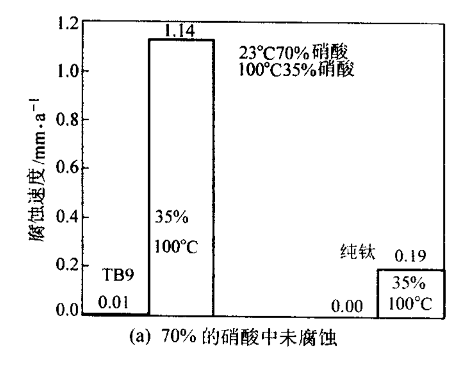


图 7.4-37　TB9 在沸腾 HCl 和 H_2SO_4 中的腐蚀率



(a) 70% 的硝酸中未腐蚀

(b) 含 $FeCl_3$1g/L,10g/L 和 50g/L 的沸腾硫酸

图 7.4-38　TB9 在还原性介质中耐蚀性

② 点蚀　由于 TB9 在氧化性介质中的耐蚀性小于纯钛，可能的情况是点蚀也会如此。例如，在 80℃的饱和 NaCl 中，TB9 的点蚀电位是 1.5～2.0 V。此电位比纯钛低得多，但却比许多钛合金高。相同的趋势也见于再钝化电位（见表 7.4-191 所示），它代表了阳极点蚀趋势的保守数据，因为它们是点蚀发生之前的最小电位。

③ 缝隙腐蚀　与涉及电蚀的阳极损坏相反，缝隙腐蚀通常是由于在缝隙部位氧化剂减少而酸化造成的。因此，TB9 在耐缝隙腐蚀方面可望超过纯钛。表 7.4-192 是 TB9 与纯钛缝隙腐蚀的比较。

④ 应力腐蚀裂纹

（Ⅰ）液体介质　在β钛合金中，β相可能对晶内和晶

表 7.4-190　TB9 在特定介质中的腐蚀速度

介质	浓度/%	温度/℃	腐蚀速度/$mm \cdot a^{-1}$
$FeCl_3$	10	沸腾	—
甲酸	50	沸腾	0.98
盐酸	0.5	沸腾	0.003
	1.0	沸腾	0.058
	1.5	沸腾	0.26
盐酸、充气	pH1	沸腾	—
硫酸、充气	1	沸腾	—
	5	沸腾	1.85
硫酸 + 3% $Fe_2(SO_4)_3$	50	沸腾	< 0.03
硫酸 + 1 g/L $FeCl_3$	10	沸腾	0.15
硫酸 + 50 g/L $FeCl_3$	10	沸腾	0.05

表 7.4-191　TB9 合金的再钝化电位

（纯钛和钛合金在沸腾氯化物溶液中再钝化）

合金	再钝化电位/V		
	5% NaCl（PH3.5）	3% HCl	饱和 NaCl
Gr.1	—	—	+7.0
Gr.2	+6.7	+5.8	+5.7
TC4（Ti-6-4）	+2.3	+1.7	—
TC19（Ti-6-2-4-6）	+3.0	+2.4	—
TB9	+3.2	+2.6	—
TA10	—	—	+5.9
TA9	—	—	+5.6

表 7.4-192　TB9 与纯钛缝隙腐蚀的比较

温度/℃	纯钛	TA10	TB9
25	无	无	无
50	无	无	无
75	有	无	无
100	有	—	—
200	—	有	无
250	—	有	无
300	—	有	无

晶间应力裂纹（SCC）敏感，这取决于化学成份和组织。晶间裂纹仅在少数几种时效β合金中发现过，尤其是在低温下时效时形成细小α析出时可能性更大。由 Mo、V、Nb 和 Ta 稳定的β相没有 SCC，但是，由共晶元素 Mg 和 Cr 稳定的β相则例外。虽然β+ω相结构似乎更容易抵抗 SCC，但是，诸如 $TiCr_2$ 等化合物在 TB9 中的析出会降低抗裂纹能力。

有关在液体介质中温度对钛合金的 SCC 行为的影响的可用数据很有限，而 TB9 的数据提醒我们，在中性盐水中，当温度高至 93℃时，K_{ISCC} 值可能相对的不受温度的影响。然而，少数几种钛合金在接近室温盐水时，存在不可忽略的 SCC 趋势，可能在高温盐水中存在 SCC 敏感性的明确的温度界限。比如 TB9（STA 状态）在 180℃以下的近似中性盐水中抵抗 SCC，但当温度高于 180℃时，通过 C－环、低应变速率试验可见，存在应力裂纹。当有 H_2S 或（和）S 存在时，可能影响小些。在这种情况下，SCC 临界温度会因组织改善和（或）少量 Pa 的加入（≤0.1%）而显著地升高（升高 15～80℃）。

对于多数 SCC 敏感的钛合金，阴、阳极化可能防止 SCC，并且升高 S_{ISCC} 的值。升高电位也可以用来提高在中性卤化物溶液中应力裂纹速度，然而，在高浓度的酸液中，第二阶段裂纹速度会与电位无关。因此，通过阴极极化来阻止的方法在高浓度酸液中不适宜。

（Ⅱ）甲醇和其他醇　与其他工程金属不同，钛和锆合金在液体和气体甲醇中对 SCC 的敏感性很强。SCC 敏感性极大地限制了包括 TB9 在内的钛合金在甲、乙醇工业中的应用。在液体溶液中对 SCC 敏感的钛合金趋于存在晶内第一阶段裂纹和穿晶第二阶段裂纹，虽然也存在例外。该例外包括 Beta Ⅲ和细晶 TB9，它们存在晶内第一、二阶段裂纹。此外，粗晶 TB9 主要显示出第一和第二阶段穿晶开裂。晶粒尺寸和相结构是 SCC 行为的直接影响因素。

应力腐蚀裂纹在纯甲醇中很难看到，但是，当 HCl 达到 10^{-6}M 时则会变得很明显。水的最小量对于 SCC 的完全阻止取决于合金成份、冶金条件、温度、卤化物水平、酸性和其方面。

对于 TB9 而言，在含中性卤化物的甲醇溶液中，加入 3～5wt%的水可以阻止 SCC。然而，通过对 TB9 在甲醇水溶液中的研究发现，对于阻止 SCC 所需的最小水量会因温度的升高而变小。许多试样也证明了在甲醇中存在晶内（第二阶段）应力裂纹与否取决于卤化物的水平。这些包括 NO_2^-、SO_3^{-2}、NaF 和 0.1 M 浓度的 Al^{+3}、Zr^{+4}、Cd^+ 和 Sn^{+2} 的金属离子。

（Ⅲ）在热盐中的 SCC　虽然迄今为止钛合金在热盐中的 SCC 还未有发生设备失效的报道，但是，实验室发现，钛合金在暴露于 210～510℃后，含卤化物残余表面在应力下有热盐 SCC 发生。

虽然 TB9 在 200℃以下没有裂纹，但是，在 180℃以上的 C－环、低应变速率的实验中，还是存在应力裂纹的。对于一些在低硫和含硫海水井管应用的 TB9 说，SCC 敏感性在热海水中有特定的温度界限。建立了 Pa 强化的 TB9，在温度达到 260℃的含硫气井的主要局部应力腐蚀和缝隙腐蚀和缝隙腐蚀数据库。

6.3　相变及显微组织

1）相变温度　730℃ ± 15℃。

2）显微组织　由于 TB9 合金的β元素含量很大，合金中β相从固溶处理温度快速冷却后会全部保留下来，而后在适当的温度下时效时，α相在β相基体上以弥散的针状形式而析出，这种α相的形态和尺寸随时效温度和时间的不同而变化。作为一固溶富β钛合金，热处理前的冷加工加速了此晶内α的形成，同时减少了晶界α的数量。

6.4　力学性能

1）技术标准规定的性能见表 7.4-193。

表 7.4-193　技术标准规定的 TB9 钛合金的室温性能

技术标准	品种	状态	δ或 d/mm	取样方向	室温力学性能，≥				
					σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	α/（°）
Q/BS	板材	ST	1.0～4.5	LT	795	760	15	—	180
Q/BS	棒材	ST	≤65	L	795	760	15	25	—
	锻件	STA1			930	895	10	20	—
		STA2			1 140	1 100	5	10	—

2）室温及各种温度下的力学性能

① 硬度曲线见图7.4-39和图7.4-40。

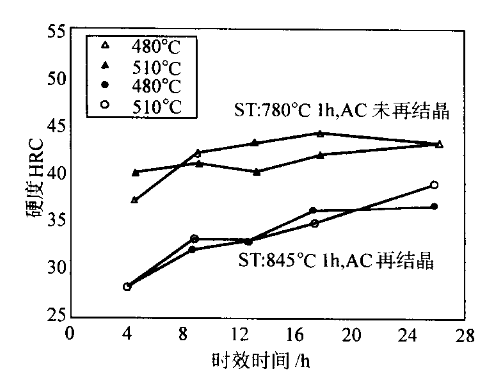


图7.4-39 TB9在480和510℃时效的洛氏硬度

② 室温拉伸性能见表7.4-194；缺口拉伸强度见表7.4-195。

③ 高温性能 优异的耐缝隙腐蚀能力和优异的高温强度，使得TB9有较佳的综合性能，可以用于诸如海水管道等工业领域。建议在350℃以下使用TB9。TB9高温性能见表7.4-196和表7.4-197。

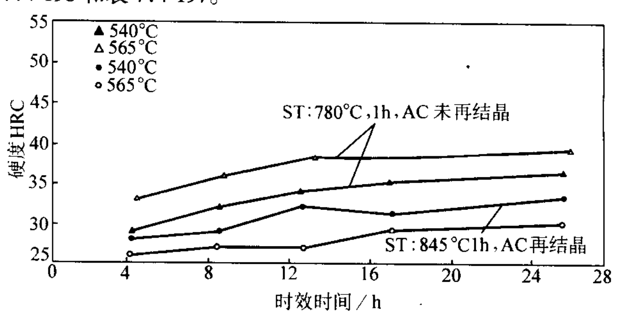


图7.4-40 TB9在540℃和565℃时效的洛氏硬度

表7.4-194 TB9合金的典型的室温拉伸性能

产品	状态	测试方向	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
0.5 mm带	SA	L	896	855	16	—
	STA	L	1 338	1 241	7	—
1.2 mm板材	SA	L	896	883	10	—
		LT	931	917	6	—
	STA	L	1 372	1 276	8	—
		LT	1 441	1 344	5	—
12 mm板材	SA	L	924	896	14	37
		LT	924	910	6	21
	STA	L	1 276	1 179	11	13
		LT	1 296	1 207	9	16
75×12.5 mm管材	STA	L	1 151	1 014	11	25
ϕ4.7 mm紧固棒	SA	L	876	862	27	50
	STA	L	1 117	1 048	18	44
ϕ5.8 mm弹簧丝	CW+A	L	1 469	—	12	28
ϕ13 mm紧固棒	ST STA1 STA2	L	885~910 1 100~1 170 1 340~1 440	— 1 045~1 100 1 255~1 345	18~20 10~12 5.6~7.5	60~65 20~22 10~12
ϕ150 mm坯	STA	L-边部	1 193	1 145	9	18
		L-半径之半处	1 207	1 151	9	17
		L-心部	1 220	1 158	9	16

表7.4-195 TB9合金板材的缺口拉伸强度

条件	预应变方向	测试方向	缺口半径/mm	K_t	缺口强度/MPa	$\sigma_b^H/\sigma_{p0.2}$
室温						
STA	—	L	0.10	8.4	648	0.53
			0.07	10.6	620	0.51
ST+CW+A	L	L	0.06	11.6	606	0.49
				11.6	593	0.48
STA	—	LT	0.07	10.6	627	0.51
				10.6	579	0.47

续表7.4-195

条件	预应变方向	测试方向	缺口半径/mm	K_t	缺口强度/MPa	$\sigma_b^H/\sigma_{p0.2}$
-35℃						
STA	L	L	0.03	16	641	0.45
ST+CW+A	L	L	0.06	11.5	531	0.38
			0.10	8.4	572	0.40
315℃						
STA	L	L	0.03	16	875	0.91
				16	841	0.87

续表 7.4-195

条件	预应变方向	测试方向	缺口半径/mm	K_t	缺口强度/MPa	$\sigma_b^H/\sigma_{p0.2}$
ST + CW + A	L	L	0.10	8.3	765	0.78
			0.15	7.7	765	0.78
STA	L	LT	0.03	16	793	0.81
				16	737	0.75

表 7.4-196 TB9 合金棒材的高温拉伸性能

测试温度/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
815℃固溶 + 565℃, 6 h, AC				
RT	1 200	1 103	14	35
93	1 034	889	17	40
205	1 027	841	16	38
315	1 082	903	12	30
425	938	758	17	40
925℃, 30 min, AC 固溶				
RT	886	835	15.0	37.2
93	772	724	21.0	47.0
205	724	648	20.0	50.1
315	669	600	22.0	49.3
425	703	593	23.5	48.7

表 7.4-197 TB9 合金管材的高温拉伸性能

测试温度/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%
ϕ19 mm × 1 mm			
RT	875	841	20
230	731	710	34
345	710	627	31
ϕ13 mm × 0.7 mm			
RT	889	862	18
230	724	689	28
345	682	606	30
ϕ9.5 mm × 0.6 mm			
RT	944	896	14
230	744	689	16
345	703	620	21

④ 高温蠕变性能见表 7.4-198 和表 7.4-199。

表 7.4-198 TB9 合金板材在 315℃时的蠕变性能 STA

时效温度/℃	315℃蠕变暴露	
	应力/MPa	96 h 变形/%
480 ~ 510	793	0.41
510 ~ 565	448	0.08
565 ~ 620	379	0.06

表 7.4-199 TB9 合金棒材的蠕变性能 STA

温度/℃	暴露条件				
	应力/MPa	至 0.1%变形的时间/h	至 0.1%变形的时间/h	至 0.1%变形的时间/h	总变形/%
315	551	800	—	1 107	0.126
370	517	50	155	190	0.241
370	517	74	185	21	0.234
425	207	32	59	72	0.250
425	207	16	38	69	0.333

⑤ 疲劳性能见表 7.4-200。

表 7.4-200 TB9 合金的高温疲劳寿命

实验条件	疲劳寿命/MPa		
	室温	205℃	370℃
无缺口			
10^3 周期	1 144	1 089	1 020
10^5 周期	855	731	634
10^7 周期	600	551	372
缺口			
10^3 周期	827	717	634
10^5 周期	303	248	275
10^7 周期	275	207	234

⑥ 断裂性能见表 7.4-201。

表 7.4-201 TB9 合金坯、锻件、中板的断裂韧性

产品形式/取样部位	热处理	方向	$\sigma_{r0.2}$/MPa	断裂韧性	
				K_Q/MPa·m$^{1/2}$	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$
坯					
ϕ150 mm（半径之半处取样）	815℃, 15 min, AC + 565℃, 12 h, AC	L	151	—	90
		LT	1 186	—	64
	815℃, 15 min, WQ + 565℃, 12 h, AC	L	1 124	—	97
		LT	1 144	—	61
ϕ150 mm	510℃, 8 h, AC	LT	1 330	—	55
	+ 暴露	LT	—	—	54
	565℃, 8 h, AC	LT	—	—	69
	+ 暴露	LT	—	—	70
	620℃, 8 h, AC	LT	—	—	81
	+ 暴露	LT	—	—	80
150 mm × 150 mm, 表面	815℃, 15 min, AC + 565℃, 12 h, AC	—	1 151	—	60 ~ 66
150 mm × 150 mm, 中心		—	1 151	—	57 ~ 71
100 × 150 mm 锻梁，中心	815℃, 15 min, AC + 565℃, 12 h, AC	L	1 158	—	58 ~ 59
32 mm 板材，心部	925℃退火 AC + 565℃, 8 h, AC	RW	1 137	53	—

续表 7.4-201

产品形式/取样部位	热处理	方向	$\sigma_{r0.2}$ /MPa	断裂韧性	
				K_Q /MPa·m^1/2	K_{IC} /MPa·m^1/2
32 mm 板材，心部	925℃退火 AC + 675℃,8 h, AC	RW	862	56	—
19 mm 板材，心部	815℃,1 h, AC + 525℃,4 h, AC	—	1 206	—	90

⑦ 弹性性能 退火或者 ST 态的 TB9 的拉伸模量 E 为 78～91 GPa，过时效时，拉伸强度和弹性模量略高（96.5 GPa），而完全时效硬化的模量 E 可达到 100～124 GPa。

TB9 高温下压缩强度与模量的关系见表 7.4-202 所示。

表 7.4-202 TB9 高温下压缩强度与模量的关系

温度/℃	试验方向	压缩模量 E_c/GPa	压缩屈服强度 $\sigma_{pc0.2}$/MPa
RT	L	102	1 110
	LT	101	1 070
200	L	93	965
	LT	94	945
370	L	85	895
	LT	82	890
480	L	77	780
	LT	78.5	800

6.5 制造工艺和性能

TB9 是一种高强度、深加工硬化性的亚稳 β 合金，最初应用于各种介质下的耐蚀锻件，以及航空与汽车工业应用。虽然精密锻件占有绝对的优势，但是各种形式的锻件也很多。

1）变形工艺和性能 TB9 为高的可锻性合金（在 β 相变点以上），其单位压力较小（变形应力），与 α-β 合金 Ti-6-4 相比，可锻性更好，裂纹敏感性也降低了。其变形应力和单位压力超过了近 β 合金 Ti-10V-2Fe-3Al。TB9 合金在热机械加工的锻造中可以得到要求的细的转变 β 组织，有限的晶界，以及细的再结晶的原始 β 晶粒尺寸，以便利于最终的热处理。TB9 锻件的高度改善的组织使其具有优良的耐蚀性、高强度和高疲劳性能。

TB9 在相变点以上可进行一次或多次锻造。再加热是为了使前面的热加工的金属再结晶以改善 β 晶粒尺寸。该合金不在两相锻造，因为组织不会得到改善，而且其单位压力有明显的提高。推荐的锻造温度见表 7.4-203 所示。

对于 TB9 来说，冷加工量一般为 60%～70%，其冷加工性能有利于无缝管、棒、丝、带和箔材的加工。当加工量达到 60%时，使材料得到明显的强化，但是当进一步加工时，影响却很小。这是因为对于 β 合金来说，前面的冷加工会加速时效反应，同时还可以得到细小、均匀的 α 晶粒。TB9 的温加工的情况很有限，但是可以预见，在 230～345℃范围内会有好的结果。从所得到的资料可见，在大约 540℃以下，时效材料不能被过度加工。

表 7.4-203 TB9 合金的锻造温度

工艺	温度/℃
β 锻造	815～980
最佳锻造	$\beta_t + 85$

2）热处理工艺和性能 该合金的热处理包括退火、固溶处理和时效。锻件可以退火或固溶态（ST）供货，也可以固溶时效态（STA）供货。ST 态的 TB9 强度低，但是 STA 态的材料的塑性和韧性却很高（建议不要用于高温条件下）。固溶处理为 815－925℃，AC。时效处理为 455～540℃。对于厚截面的锻件，有报道指出，采用三步的热处理可以得到强度、塑性、韧性和疲劳的最佳组合。研究的工艺为：920℃固溶处理，AC/快冷，＋820℃退火，A/C 快冷＋280℃时效处理。硅化物（硅是中性合金的残余元素）或许对塑性和韧性有害，它可能是由于某些超过相变的退火而形成于 TB9 的晶界。近期的研究建议，在硅化物固溶线以上固溶处理，然后快速水冷，再在以上提到的热处理度下热处理，就可能减少晶界连续的硅化物，并因此改善性能。

TB9 可以达到许多的强度/塑性的组合，这取决于加工工艺和热处理制度。其时效工艺可以在较大的范围内变化，以便使 TB9 合金得到要求的强度水平和与此相关的机械性能。

完全退火可以用于降低 TB9 中的残余应力，在一定的情况下，材料可能要求时效或者过时效，因此材料可以在此工艺中使残余应力得以消除。对于 TB9 来说，退火与固溶处理是相同的。

固溶处理：在大生产中必须对固溶处理工艺加以注意，还必须注意到加工历史和材料所要求的力学性能。一个推荐的固溶处理工艺为 815℃/30 min，AC（或者 WC)。然而，在温度至 925℃时，通过固溶处理可以得到好的性能（在固溶条件下得到高的延性，在时效下可以得到高的强度和延性的组合。）更高的温度（比如 925℃）一般用于厚截面或者棒材的热处理，而较低的温度用于处理丝与薄板。固溶温度对中板的延性有较大的影响，但是对小直径的棒材的影响则很小。

时效温度：455℃ 至 540℃ 为时效温度范围。虽然在 455℃至 465℃的时效温度下，12～24 h 的处理用于使材料达到最高的强度，但是在时效温度下，一般时效时间为 6～12 h。时效后一般为空冷。

6.6 选材及应用

TB9 合金用作紧固件、弹簧、扭力棒、以及加工为箔材用作制造层状复合材料的芯金属。它还可以用于油、气、地热井的井管和壳体。

使用局限：象其他 β 钛合金一样，TB9 对吸氢非常敏感，而且在加热、酸洗和化学热处理时有快速的氢扩散。然而，由于 H 在 β 相中的溶解度比在 α 相中大得多，该合金的耐 H 性能要比 α 钛合金和 α＋β 合金大得多。

ST 态的 TB9 可以被焊接。但是，最好别在 STA 后焊接。在酸洗时一定要注意，以避免吸 H。

7 TB10 钛合金

TB10 合金是一种近 β 型钛合金，含有 3%的 α 稳定元素 Al，5%的同晶型 β 稳定元素 Mo 和 V，以及 2%的共析型 β 稳定元素 Cr，简称 Ti-5523 合金。该合金具有比强度高、断裂韧度高，淬透性较好，且热加工工艺性能和机加工性能十分优异，加工温度及变形抗力远低于大多数工业钛合金等一系列优点，满足高结构效益、高可靠性结构件的使用要求，是理想的结构材料。

TB10 合金的主要半成品有棒材和锻件，也可以制成厚板。用于航天结构件，也可以用于制造飞机机身和机翼结构中的锻造零件。通过热处理可以实现不同强度、塑性和韧性水平的配合。TB10 合金的最高长期工作温度为 300℃。

7.1 化学成分

根据 QBJY 1—1988《分离套用盲孔空心锻件暂行技术规范》；QBJY 2—1989《高压隔离套用通孔锻件暂行技术规范》；QBJY 3—1990《YH-21 硬回收装置用高强高韧钛合金锻件暂行技术规范》和 QBJY 4—1992《航天用 Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al 棒材暂行技术规范》规定的化学成分见表 7.4-204。

表 7.4-204 TB10 钛合金化学成分（质量分数） /%

合金元素					杂质≤						
Mo	V	Cr	Al	Ti	Fe	C	N	H	O	其他元素 单个	其他元素 总和
4.5~5.5	4.5~5.5	1.5~2.5	2.5~3.5	余量	0.30	0.05	0.04	0.015	0.15①	0.1	0.4

① 在航空中使用，规定 O≤0.13%。

7.2 物理及化学性能

1）密度 $\rho=4.80\ g/cm^3$。

2）热导率见表 7.4-205。

表 7.4-205 TB10 钛合金热导率

θ/℃	100	200	300	400	500	600
$\lambda/W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	8.4	10.9	12.3	13.5	15.2	16.5

3）比热容见表 7.4-206。

表 7.4-206 TB10 钛合金比热容

θ/℃	100	200	300	400	500	600
$c/J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$	527	545	559	578	596	618

4）线胀系数见表 7.4-207。

表 7.4-207 TB10 钛合金线胀系数

θ/℃	20~100	20~200	20~300	20~400	20~500	20~600
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	8.6	9.0	9.2	9.6	9.7	10.7

5）电阻率见表 7.4-208。

表 7.4-208 TB10 钛合金电阻率

θ/℃	20	100	200	300	400	500
$\rho/\mu\Omega\cdot m$	1.38	1.38	1.42	1.45	1.48	1.52

6）抗氧化性能参见 TC4 钛合金。

7）耐腐蚀性能参见 TB2 钛合金。

7.3 相变及显微组织

1）相变温度 α+β↔β的转变温度为 810~830℃。

2）β相区固溶（ST）和时效过成中的相变及组织 TB10 合金中β稳定元素的总含量（质量分数）12%，Mo 当量为 13.76。在β相区固溶、水淬的过程中，因亚稳定β相的稳定度不够，在β相内形成微细弥散的淬火ω相，称为ω_{ath}，得到β+ω_{ath}相组织，淬火后的β相称为β_m。

合金在β相区固溶（ST）水淬后得到$\beta_m+\omega_{ath}$相组织，极细小、弥散的ω_{ath}相分布在β_m相基体内，其几何尺寸为 20~30 Å。电子衍射分析表明，ω_{ath}相为六方结构，与其β基体相间的取向关系是：(0001) ω// (11$\bar{1}$) β;〔1$\bar{2}$10〕ω//〔101〕β。

此外，β固溶淬火组织中还有应力诱发马氏体产物。

300℃时效的组织与结构 β固溶淬火样品在 300℃时效 10 min，β_m 基体相中已有等温ω（称为ω_{iso}）相析出，过渡相ω_{iso}非常细小弥散。随着时效时间的延长，ω_{iso}相逐渐形核长大，时效 24 h 的ω_{iso}相尺寸为 100~200 Å，其形态趋向于椭圆状。电子衍射分析表明，等温时效析出的过渡相ω_{iso}为六方结构，与β基体相间的取向关系亦是：

(0001) ω// (11$\bar{1}$) β;〔1$\bar{2}$10〕ω//〔101〕β。

300℃时效，βm 相分解反应式为：$\beta m\rightarrow\beta+\omega_{iso}$

400℃时效的组织与结构 β固溶淬火样品在 400℃时效 10 min 就析出了过渡相ω_{iso}，几何尺寸约 300 Å。$[113]_\beta$ 晶带电子衍射分析表明，除含有大量ω_{iso}相外，还有极少量的α相。随着时效时间的延长，ω_{iso}相逐渐减少，α相逐渐增加。时效 2 h 后α相明显增加，时效 8h 的样品，ω_{iso}相的衍射斑点完全消失，只有α相的衍射斑点。时效 24 h 样品的衍射花样，除α相的衍射斑点外，在〔1$\bar{1}$0〕β附近出现了弧形反射。这种弧形反射的"浑环"表明，已开始了α相类型的转变，即$Ⅰ_\alpha$向$Ⅱ_\alpha$转变。

400℃时效，β_m 相分解反应式为：

$$\beta_m\rightarrow\beta+\omega_{iso}+Ⅰ_\alpha\rightarrow\beta+Ⅰ_\alpha+Ⅱ_\alpha$$

500℃时效的组织与结构 500℃时效 10 min 的样品，电子衍射分析表明，除有大量$Ⅰ_\alpha$外，在〔110〕β附近有$Ⅱ_\alpha$相的弧形反射，说明在 500℃时效 10 min 已开始了$Ⅰ_\alpha$向$Ⅱ_\alpha$转变。在 500℃时效 8~24 h 的样品中，$Ⅰ_\alpha$和$Ⅱ_\alpha$共存，只是两种类型α相的形态和数量有变化。

500℃时效，β_m 相分解反应式为：$\beta_m\rightarrow\beta+Ⅰ_\alpha+Ⅱ_\alpha$

600℃时效的组织与结构 β_m 相在 600℃等温分解过程与 500℃的情况相似，时效初期（10~30 min），$Ⅰ_\alpha$从β相基体中直接析出，并逐渐向$Ⅱ_\alpha$转变，为两种类型α相共存。时效后期（8~24 h），$Ⅰ_\alpha$的电子衍射斑点逐渐从电子衍射花样上消失，$Ⅱ_\alpha$的弧形反射效应增强。600℃时效 24 h 样品的 TEM 像和电子衍射花样表明，该样品是由粗大的$Ⅱ_\alpha$和β相组成。

600℃时效，β_m 相分解反应式：$\beta_m\rightarrow\beta+Ⅰ_\alpha+Ⅱ_\alpha\rightarrow\beta+Ⅱ_\alpha$

总之，β相区固溶（ST）水淬 + 时效时β_m 相变规律为：

β-ST+300℃时效：$\beta_m\rightarrow\beta+\omega_{iso}\rightarrow\beta+\omega_{iso}+Ⅰ_\alpha$

β-ST+400℃时效：$\beta_m\rightarrow\beta+Ⅰ_\alpha\rightarrow\beta+Ⅰ_\alpha+Ⅱ_\alpha$

β-ST+500℃时效：$\beta_m\rightarrow\beta+Ⅰ_\alpha+Ⅱ_\alpha$

β-ST+600℃时效：$\beta_m\rightarrow\beta+Ⅰ_\alpha+Ⅱ_\alpha\rightarrow\beta+Ⅱ_\alpha$

3）两相（α-β）固溶（ST）和时效过程中的相变规律

α-β相区固溶、水淬后得到：β+$\alpha_{初}$

α-βST+500-520℃时效：$\beta_m\rightarrow\beta+\alpha_{初}+Ⅰ_\alpha+Ⅱ_\alpha$

7.4 力学性能

1）技术标准规定的性能见表 7.4-209。

表 7.4-209 TB10 钛合金技术标准规定的性能

技术标准	品种	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	a_{KU} /J·cm^{-2}	K_{IC} /MPa·m$^{1/2}$
QBJY1—88	盲孔锻件	≥900	≥840	≥7	≥20	—	≥55

续表 7.4-209

技术标准	品种	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	a_{KU} /J·cm^{-2}	K_{IC} /MPa·m$^{1/2}$
QBJY2—89	通孔锻件	≥1 177	≥1 079	≥8	≥25	—	≥45
QBJY3—90	盲孔锻件	≥1 128 1 177	≥1 055 1 105	≥8 7	≥25 20	≥40 30	≥55 50
QBJY4—92	棒 ϕ12 mm 60 mm	≥ 1 350 1 300	≥ 1 280 1 230	≥ 10 5	≥ 40 20	— — —	— — —

2）合金 α-β 相区固溶时效的特性　合金在 α-β 相区固溶后时效强化，随着时效强度增加，延性（断面收缩率）指标不但不下降，反而增加。其性能见 7.4-210。

表 7.4-210　钛合金固溶和固溶时效性能

热处理	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%
两相区固溶，水淬	916	13.0	56.0
两相区固溶，水淬＋时效	1 320	13.0	58.0
两相区固溶、空冷	1 000	12.0	58.5
两相区固溶、空冷＋时效	1 292	13.0	65.0
	1 257	13.0	71.0

3）合金棒材的典型性能见表 7.4-211 和表 7.4-212。

表 7.4-211　TB10 钛合金棒材室温拉伸性能

规格/mm	热处理制度	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%
ϕ15	两相区固溶，空冷＋540℃/6 h，空冷	1 257	13.0	71.0
ϕ15	两相区固溶、水淬＋540℃/6 h、空冷	1 292	13.0	65.0
ϕ15	两相区固溶，水淬＋520℃/8 h、空冷	1 321	13.0	58.0
ϕ15	形变热处理	1 279	11.0	66.5
ϕ24	形变热处理	1 324	12.0	59.0
15×25	形变热处理	1 245	14.0	61.5
25×70	形变热处理	1 255	13.5	59.5

表 7.4-212　TB10 钛合金的 σ_b、K_{IC} 性能关系

规格/mm	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$
15×25	1 238	12.0	62.0	84.0
15×25	1 310	10.0	59.5	66.0
25×70	1 262	14.0	53.0	80.0

4）合金棒材的高温性能　用 15 mm×25 mm 方棒检测了合金形变热处理（锻态＋580℃/3 h，空冷）状态，400℃的高温性能、热稳定性能和持久性能，分别列于表 7.4-213 和表 7.4-214。

表 7.4-213　TB10 钛合金高温拉伸和持久性能

检测温度/℃	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%
20	1 259	14.0	60.0
	1 229	14.0	63.0
400	1 002	14.0	68.5
	1 013	14.0	68.5
400	应力/MPa	804	
	持续时间/h	>100	

表 7.4-214　TB10 钛合金 400℃的热稳定性能

热暴露	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%
未热暴露	1 244	14.0	61.5
400℃/50 h 热暴露	1 330	6.0	23.0
	1 248	9.0	39.0
400℃/100 h 热暴露	1 317	9.5	48.0
	1 394	5.0	19.0

7.5　制造工艺和性能

1）合金熔炼：TB10 合金，采用两次或三次真空自耗电弧炉熔炼。

2）热处理工艺和性能

① 热处理

固溶处理　通常选在两相区进行 Tβ－（40～50)℃水淬

时效　500～540℃，空冷

TB10 合金是一种近 β 型钛合金，在 β 单相区固溶水淬后得到 β＋ω_{ath} 相组织，在 300～400℃时效 β 相中析出 ω_{iso} 相，在 500℃以上温度时效 β 相直接析出 α 相，时效强化效应大，但塑性低。为获得最佳的综合性能，需调整热处理制度。通常采用两相区固溶时效（时效温度高于 500℃）和形变热处理。为获得最佳的综合性能，可采用两相区固溶加二次时效的方法。

横截面厚度大于 100 mm 的锻件，在固溶处理之前，必须预先机加到最大截面厚度不大于 100 mm。

② 温度控制偏差　固溶处理温度偏差不应超过±10℃。时效处理温度偏差不应±5℃。

③ 零件去应力退火可在空气炉或真空炉中进行。

3）热变形工艺和性能　TB10 合金铸锭和成品锻造，在蒸汽锤或水压机上，均采用 β 相区锻造。

热变形工艺参数见表 7.4-215。

表 7.4-215　TB10 钛合金热变形工艺参数

热变形类型	加热温度/℃	终止温度/℃	一火次变形量
铸锭开坯	1 100～1 150	850	β 区 50%～70%
棒材锻造	820～850	720	β 区 40%～60%，α-β 区 20%～40%
棒材扎制	810～830	700	β 区 50%～70%，α-β 区 30%～50%
自由锻件	820～850	720	β 区 40%～60%，α-β 区 20%～40%
锻锤模锻	820～840	700	β 区 40%～60%，α-β 区 25%～35%
等温模锻	770～780		α-β 区 35%～55%

4）切削加工与磨削性能　TB10 合金的切削加工和磨削性能与 TC4 合金相似。

7.6　选材及应用

TB10（Ti-5523）合金在石油化工和航天领域的应用：

1）在石油化工领域中应用 作为承压结构件，已在石油化工领域获得应用。

① TB10合金分离套研制

（Ⅰ）钛合金分离套的技术指标

ⅰ）分离套规格尺寸：ϕ100 mm×202 mm（其中上部ϕ100 mm×65 mm，下底部ϕ76.4 mm×102 mm，外径ϕ100 mm→ϕ76.4 mm的过渡段35 mm）变断面不通孔锻件，内孔ϕ65 mm×184 mm，底厚18 mm。

ⅱ）分离套用材料要求中强度、高韧性、不导磁；

ⅲ）主要力学性能指标 $\sigma_b \geqslant 900$ MPa，$\sigma_{p0.2} \geqslant 840$ MPa，$\delta_5 \geqslant 7\%$，$\psi \geqslant 20\%$，$K_{IC} \geqslant 55.0$ MPa·m$^{1/2}$。

ⅳ）水压试验压力为48.9 MPa。

（Ⅱ）TB10合金分离套达到的力学性能 $\sigma_b = 920$ MPa，$\sigma_{p0.2} = 850$ MPa，$\delta_5 = 8.5\%$，$\psi = 37.0\%$，$K_{IC} = 86.5$ MPa·m$^{1/2}$。

（Ⅲ）水压试验 TB10合金分离套经水压压力48.9 MPa，稳压30 min后，降至39.2 MPa，未发现异常现象，通过了水压试验。

② TB10合金高压隔离轴套见图7.4-41。

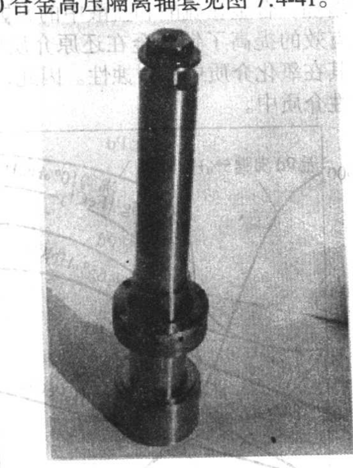


图7.4-41 TB10钛合金高压隔离轴套

（Ⅰ）高压隔离轴套的技术指标

ⅰ）高压隔离轴套的规格尺寸：ϕ63.1 mm×285 mm变断面通孔锻件、内孔ϕ20.2 mm×285 mm。

ⅱ）高压隔离轴套用材料 要求有高强度、高韧性、不导磁。

ⅲ）高压隔离轴套的主要力学性能指标 $\sigma_b \geqslant 1177$MPa，$\sigma_{p0.2} \geqslant 1\,079$ MPa，$\delta_5 \geqslant 8\%$，$\psi \geqslant 25\%$，$K_{IC} \geqslant 45$ MPa·m$^{1/2}$。

ⅳ）水压试验，试验压力250 MPa。

（Ⅱ）TB10合金高压隔离轴套达到的力学性能指标 $\sigma_b = 1230$ MPa，$\sigma_{p0.2} = 1130$ MPa，$\delta_5 = 12.0\%$，$\psi = 46.5\%$，$K_{IC} = 72.5$ MPa·m$^{1/2}$。

（Ⅲ）水压试验：TB10合金高压隔离轴套经过了水压压力250 MPa，稳压30 min后，降至60 MPa，未发现异常现象，通过了水压试验。

2）在航天领域中的应用

① YH-21 TB10合金硬回收装置

（Ⅰ）YH-21硬回收装置的选材标准 该装置用于导弹触靶回收，其使用条件为：50万g~80万g的高冲撞、350~600℃瞬时温度的环境中，为满足环境条件下可靠回收，该装置的结构采用高强高韧钛合金。

（Ⅱ）YH-21硬回收装置的技术指标 硬回收装置的本体、外套、密封盖Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、后盖、垫圈和柱头螺钉均由TB10（Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al）合金制作。

本体和密封盖等锻件的主要力学性能指标：$\sigma_b \geqslant 1128$ MPa，$K_{IC} \geqslant 55$ MPa·m$^{1/2}$，$a_{KU} \geqslant 40$ J/cm^2。

外套和后盖锻件的主要力学性能指标：$\sigma_b \geqslant 1\,177$ MPa，$K_{IC} \geqslant 50$ MPa·m$^{1/2}$，$a_{KU} \geqslant 30$ J/cm^2。

本体和外套的空心盲孔锻件，见图7.4-42。

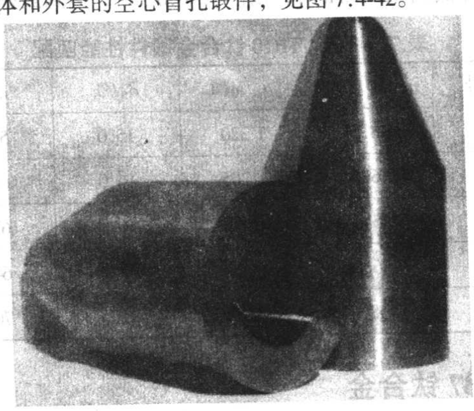


图7.4-42 TB10合金空心盲孔锻件

（Ⅲ）TB10合金锻件达到的性能指标 用40 mm×50 mm方棒选择的热处理制度及性能，见表7.4-216。

表7.4-216 TB10钛合金40 mm×50 mm棒材典型的四组匹配性能

热处理	a_{KU}/J·cm^{-2}	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%
580℃/3 h，空冷	32.0	1 300	7.5	17.0
600℃/3 h，空冷	37.5	1 210	10.0	33.0
620℃/3 h，空冷	56.5	1 150	10.0	35.0
750/30 min，水淬+520℃/8 h↗620℃/30 min，空冷	77.0	1 050	14.0	57.0

从ϕ118 mm不通孔试验件上取样，选择σ_b为1 140~1 210 MPa水平的三种热处理制度分别检测a_{KU}、σ_b和K_{IC}性能，确定锻件的热处理制度及a_{KU}、σ_b和K_{IC}性能的匹配关系，其结果见表7.4-217。

表7.4-217 TB10钛合金不通孔锻件的a_{KU}、σ_b和K_{IC}性能

热处理	σ_b/MPa	a_{KU}/J/cm^2	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$
600℃/3 h，空冷	1 190	32.5	67.5
620℃/3 h，空冷	1 140	45.0	71.0
770℃/30 min，水淬+520℃/8 h↗620℃/30 min，空冷	1 110	52.0	70.5

② 星箭连接系统用TB10（Ti-5523）合金连杆，用ϕ60 mm的棒材制作而成，达到的性能指标：$\sigma_b = 1\,350$ MPa，$\sigma_{p0.2} = 1\,280$ MPa，$\delta_5 = 8\%$，$\psi = 25\%$。

2000年9月1日我国资源二号（尖兵三号）卫星发射成功，应用于尖兵三号星箭解锁装置的Ti-5523合金连杆在地面试验中能可靠承受卫星预紧力载荷，材料性能稳定，在卫星的发射和飞行中，连杆工作正常，保证了卫星飞行的圆满成功。

③ 神州二号轨道舱用TB10（Ti-5523）合金插簧，用ϕ12 mm的细棒制作而成，达到的性能指标：$\sigma_b = 1\,400$ MPa，$\sigma_{p0.2} = 1\,320$ MPa，$\delta_5 = 15\%$，$\psi = 60\%$。

④ 航天用锻件五组 a_{KU} 与 σ_b 匹配性能，见表 7.4-218。数据表明，a_{KU} 随着 σ_b 的降低而升高。σ_b = 1 320 MPa 时，a_{KU} = 38.5 J/cm²；当 σ_b 降到 1 170 MPa 时，a_{KU} 上升到 55.5 J/cm²；当 σ_b 降到 1 090 MPa 时，a_{KU} 上升到 66.5 J/cm²；当 σ_b 降低到 925 MPa 时，a_{KU} = 148.0 J/cm² 达到最好水平。

表 7.4-218　TB10 钛合金锻件性能匹配

序号	a_{KU}/J·cm^{-2}	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%
1	38.5	1 320	15.0	59.5
2	46.5	1 205	16.0	63.0
3	55.5	1 170	16.0	67.0
4	66.5	1 090	17.0	64.5
5	148.0	925	22.5	70.5

8　TB7 钛合金

TB7 是一种在高浓度还原性酸（H_2SO_4、HCl 等）中具有优异耐蚀性能的耐蚀钛合金，其名义成分为 Ti－32Mo。该合金含有高达 32%的难熔金属元素 Mo，熔铸时保证获得成分均匀和没有钼夹杂的铸锭，是生产该合金材料的技术关键。

TB7 合金是一种 β 型钛合金。但由于它的铸态金属塑性有限，变形抗力大，铸锭开坯有一定困难。TB7 钛合金可用于铸造化工机械的泵、阀等零件，也可生产包括锻件、棒材、板材和管材等形式的半成品。在化工行业中主要用于纯钛及其他钛合金难以胜任的强还原性酸工况环境。

相近牌号：4201（前苏联）。

8.1　化学成分

铸造和变形的 TB7 合金的化学成分如表 7.4-219 所示。

表 7.4-219　TB7 合金的化学成分（质量分数）%

牌号	合金元素		杂质元素≤						其他元素	
	Mo	Ti	Fe	Si	C	N	H	O	单个	总合
TB7	30.0～34.0	余量	0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.15	0.10	0.4
4201	31.0～35.0	余量	0.25	0.10	0.10	0.04	0.012	0.12	0.10	0.4

铸造的 Ti-32Mo 合金以牌号 ZTB32 列入国标 GB/T 15073-94，变形的 Ti-32Mo 合金尚未列入国标。

8.2　物理及化学性能

1）密度 ρ = 5.58 g/cm³。

2）熔化温度 1 780℃。

3）热导率见表 7.4-220。

表 7.4-220　TB7 钛合金的热导率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
λ/W·m^{-1}·K^{-1}	7.1	7.5	10.0	10.7	13.6	15.3	16.8

4）比热容见表 7.4-221。

表 7.4-221　TB7 钛合金的比热容

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
c/J·kg^{-1}·K^{-1}	—	578	586	540	507	477	486

5）线胀系数见表 7.4-222 所示。

表 7.4-222　TB7 钛合金的线胀系数

θ/℃	20～100	20～200	20～300	20～400	20～500	20～600	20～700	20～800	20～900	20～1 000
α/10^{-6}K^{-1}	11.2	13.3	14.3	15.0	15.2	15.3	15.7	16.2	16.7	17.3

6）电阻率见 7.4-223。

表 7.4-223　TB7 钛合金的电阻率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
ρ/μΩ·cm	1.42	1.44	1.47	1.50	1.54	1.57	1.61

7）磁性能　无磁性。

8）抗氧化性能　在空气中加热至 350～400℃时还比较稳定，当加热温度升至 500℃以上时，该合金显著氧化。

9）耐蚀性能

① 钼对 TB7 合金耐蚀性的影响　图 7.4-43 和图 7.4-44 是钛钼合金含钼量对合金在各种介质中腐蚀性的影响。从图 7.4-43 可见，当 Mo 含量低于 20%时，它可明显提高钛钼环境在还原性和氧化性介质中的耐腐蚀性。从图 7.4-44 可见，随着钼含量的增加，合金在硫酸和盐酸中的腐蚀率降低。研究表明，钼最有效的提高了钛合金在还原介质中的耐蚀性，但是却降低了其在氧化介质中的耐蚀性。因此，钛钼合金不适用于强氧化性介质中。

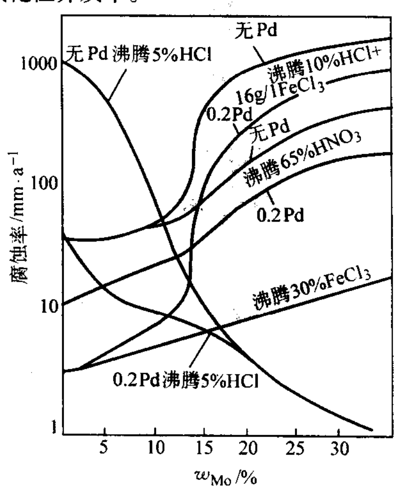


图 7.4-43　钼对钛耐蚀性的影响

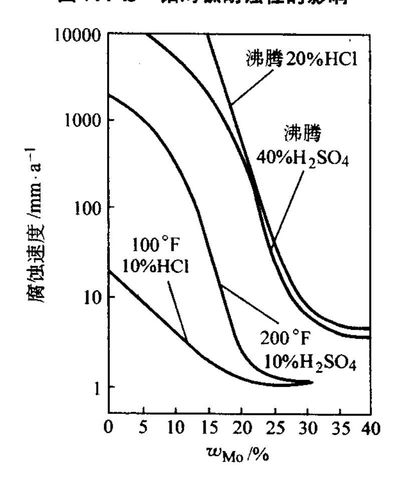


图 7.4-44　钼对钛在还原介质耐蚀性的影响

由含钼 1%～30%的钛钼合金的阳极极化行为表明，在沸腾的 0.9 mol/L NaCl + 0.1 mol/L HCl 溶液中，含 Mo > 5%的合金无活化腐蚀区，Ti-30Mo 合金与 Ti-1Mo 合金比较，其腐

蚀电位增加了 0.25 V（由 - 0.55 增至 0.3 V/SCE）。在沸腾 1 M HCl中，仅 Ti - 20Mo、Ti - 30Mo 合金的腐蚀电位高于纯钛活化区电位。在 + 0.1 V/SCE 电位出现了第二个活化区，几种钛钼合金的电流密度按以下含钼秩序排列：10% Mo > 20% Mo > 30% Mo > 5% Mo > 1% Mo。这些研究证实，在还原性条件下，钼有利于提高钛的耐蚀性。而在氧化性条件下，反而降低了钛的耐蚀性。

② TB7 合金的耐蚀性　TB7 合金和其他钛钼合金在各种介质中的耐蚀性见表 7.4-224 ~ 表 7.4-227 所示。从表可以看出，Ti - 30Mo 和 Ti - 32Mo 合金是在还原性酸中最好的耐蚀钛合金材料，但这两种合金在氧化性介质中的耐蚀性较差。同时还发现，在 260℃、20% H_2SO_4 介质中，TB7 合金会发生氢脆。研究表明，添加钯的钛钼合金可改善其在氧化性介质中的耐蚀性。

表 7.4-224　Ti - 30Mo 的耐蚀性

介质	浓度（质量分数）/%	温度/℃	腐蚀速度/mm·a^{-1}
HCl	10	沸腾	0.1
	20	沸腾	0.25
	浓	20	0.1
H_2SO_4	15	沸腾	< 0.1
	50	沸腾	0.2 ~ 0.4
	60	沸腾	0.8 ~ 19
	60	100	0.2
H_3PO_4	70	沸腾	5 ~ 20
	70	100	0.2
	80	沸腾	30
	浓	沸腾	> 1 000
	50	沸腾	0.1
	60	沸腾	0.15
	70	沸腾	0.15
	80	沸腾	0.8（点蚀）
HNO_3	25	沸腾	10
	25	20	0.1
草酸	10	沸腾	0.7
$CuCl_2·2H_2O$	10	沸腾	< 0.01
$FeCl_3$	40	沸腾	0.02
$AlCl_3$	30	沸腾	0.08
$AlCl_3$	过饱和	沸腾	0.1

表 7.4-225　Ti - 32Mo 在硫酸中的耐蚀性

浓度（质量分数）/%	腐蚀速度/mm·a^{-1}			
	室 温	50℃	75℃	90 ~ 93℃
10	0.009	0.002	0.095	0.190
20	0.007	—	0.062	0.106
30	0.001	0.007	0.047	0.073
40	0.000	0.003	0.013	0.038
50	0.000	0.004	0.023	0.030
60	0.000	0.006	0.017	0.044
80	0.000	0.011	0.017	0.085
90	0.014	0.115	0.660	—

表 7.4-226　Ti - 32Mo 在盐酸中的耐蚀性

浓度（质量分数）/%	腐蚀速度/mm·a^{-1}			
	室 温	50℃	75℃	90 ~ 93℃
10	0.009	0.004	0.024	0.035
20	0.057	0.004	0.024	0.096
36 ~ 37	0.012	—	—	—

表 7.4-227　Ti - Mo 钛合金在盐酸中的腐蚀速度 mm·a^{-1}

合金成分（质量分数）	室温		50℃		75℃		90 ~ 93℃	
	10%	20%	10%	20%	10%	20%	10%	20%
Ti - 32Mo	0.009	0.057	0.004	0.004	0.024	0.024	0.035	0.096
Ti - 32Mo - 2Nb	0.009	0.006	0.002	0.000	0.001	0.040	0.066	0.063
Ti - 32Mo - 5Nb	0.009	0.062	0.001	0.003	0.018	0.043	0.042	0.067
Ti - 25Mo - 15Nb	0.007	0.034	0.004	0.006	0.006	0.069	0.116	0.112
Ti - 15Mo - 0.2Pd	0.000	0.011	0.008	0.167	—	1.13	0.255	0.109
Ti - 32Mo 焊接	0.008	0.057	0.002	0.004	0.021	0.025	0.044	—
Ti	0.017	0.204	4.11	12.5	—	—	—	—
Ti - 0.2Pd	0.000	0.000	0.015	6.67	0.008	—	1.04	—

8.3　相变及显微组织

1）相变和组织转变　TB7 合金的相变和组织转变见图 7.4-45、图 7.4-46 所示。

从图 7.4-45 和图 7.4-46 可以看出，该合金属于体心晶体 β - Ti 和以钼为基的合金。但是在 500 ~ 600℃时，由 β 钛变为 α 钛，发生同素异形转变，β 固溶体可能分解，由于临近 β⇆α 转变边界，其 α 相数量不大。

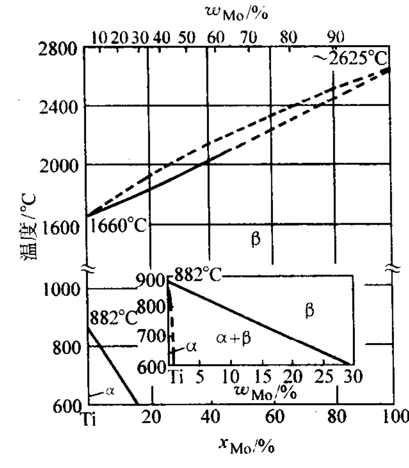


图 7.4-45　Ti - Mo 平衡相图

2）显微组织　TB7 钛合金不同状态挤压棒的显微组织见图 7.4-47 所示。

图 7.4-47 为直径 230 mm 热挤压棒的显微组织，该组织由粗晶和第二相析出物组成。按照 Ti - Mo 系状态图，这可能是由于 β 固溶体部分分解形成 α 相，或某些亚稳定相。经 1 100℃淬火固溶后的显微组织虽然粗大，但是析出物消失

（见图 7.4-47）。直径 45 mm 的挤压棒的组织较微细小均匀。

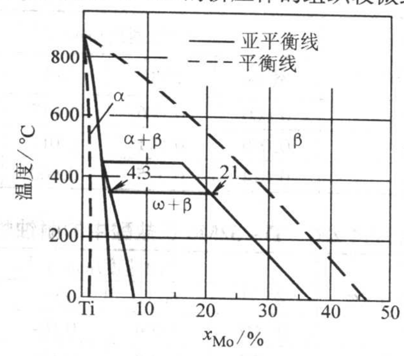


图 7.4-46 Ti－Mo 亚平衡相图显示了 ω/（ω+β）和（α+β）/β 相界

8.4 力学性能

1）技术条件规定的性能见表 7.4-228。

2）室温及各种不同温度下的力学性能 TB7 合金不同温度下的力学性能见图 7.4-48、图 7.4-49 所示。

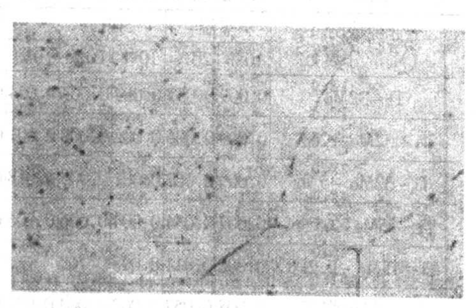
3）不同品种产品的力学性能 见表 7.4-229、表 7.4-230 所示。

4）持久、蠕变和疲劳性能 板材不同温度的持久及蠕变性能见表 7.4-231 所示。

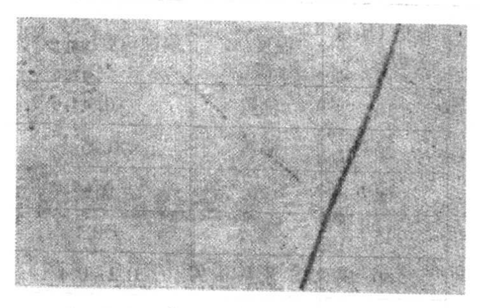
5）弹性性能 2 mm 厚的 TB7 板材在不同温度下的弹性模量见表 7.4-232 所示。

6）TB7 合金的热稳定性 见表 7.4-233 所示。

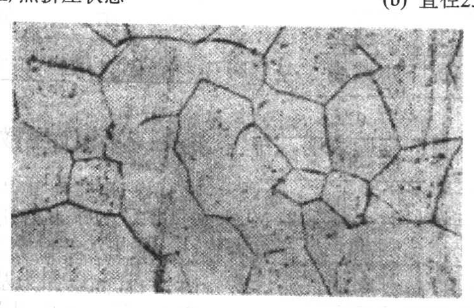
由表 7.4-233 数据可见：在 200℃和 350℃长期时效（由 100 h 到 1 000 h）时合金的强度和塑性指标没有改变。强度极限在 200℃时仍然在 740～795 MPa 范围内，而在 350℃时，



(a) 直径230mm, 热挤压状态



(b) 直径230mm, 1100℃淬火



(c) 直径45mm, 热挤压状态

图 7.4-47 TB7 棒材的显微组织

表 7.4-228 TB7 技术条件规定的性能

技术条件	品种	状态	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ/%	ψ/%	硬度 HB
GB/T 6614—94	铸件	铸态	795	—	2	—	260
俄技术条件	棒、厚板	退火	863	765	16	28	—
	薄板	退火	785～835		10		

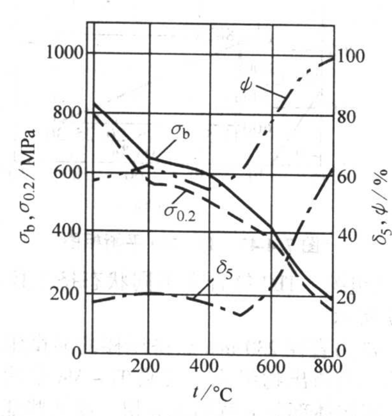


图 7.4-48 TB7 合金棒材不同温度下的力学性能

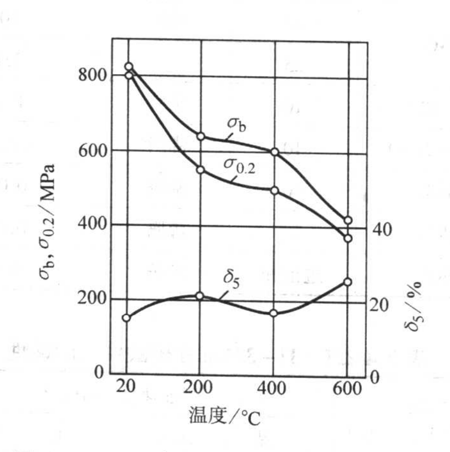


图 7.4-49 TB7 合金板材不同温度下的力学性能

表 7.4-229 不同直径 TB7 棒材的力学性能

直径/mm	取样部位	σ_b/MPa	δ/%	ψ/%
230	边缘	1 005	1.2	8.6
	中心	855	0.4	—

续表 7.4-229

直径/mm	取样部位	σ_b/MPa	δ/%	ψ/%
110	边缘	850	15.4	33.8
	中心	850	3.6	5.6
45	整个断面	880	16.8	50.2
15	整个断面	740	25.5	60.2

表 7.4-230　不同状态 TB7 板材的力学性能

品种与状态	σ_b/MPa	σ_{ps}/MPa	δ/%	ψ/%
厚板				
热轧	875	855	13.7	31.8
热轧、酸洗、退火	885	840	15.7	43.1
薄板				
温轧、酸洗	920	890	7.0	—
温轧、850℃大气退火、酸洗	850	825	10.5	—
温轧、850℃淬火、酸洗	855	810	5.7	—
温轧、酸洗、850℃真空退火	845	825	17.1	—
温轧、酸洗、1 200℃真空退火	575	—	0.4	—

表 7.4-231　TB7 板材的持久及蠕变性能

性能	试验温度/℃			
	200	400	600	800
持久强度/MPa				
100 h 以内	625	560	125	25
1 000 h 以内	620	—	—	—
蠕变极限/MPa				
100 h 以内	540	—	44	—
1 000 h 以内	510	—	—	—
2×10^7 次循环的疲劳极限/MPa	285	—	285	—

表 7.4-232　2 mm 厚的 TB7 板材在不同温度下的弹性模量

温度/℃	20	100	200	300	400	500	600
E/GPa	108	107	105	102	100	96	92

表 7.4-233　TB7 合金的热稳定性能

热暴露温度 θ/℃	t/h	σ_b/MPa	σ_s/MPa	δ/%	ψ/%	a_{KU} /kJ·cm^{-2}
挤压状态		740	735	25.5	60.2	5.65
900℃淬火		740	735	23.6	64.1	8.72
200	100	780	775	23.5	62.6	9.22
	300	760	760	23.0	63.4	10.38
	500	795	790	24.11	60.09	7.65
	1 000	800	790	24.51	61.48	9.1
350	100	765	765	28.1	62.2	11.72
	300	760	760	25.7	62.15	12.0
	500	745	745	24.7	63.9	10.8
	1 000	775	770	25.8	61.0	10.3

续表 7.4-233

热暴露温度 θ/℃	t/h	σ_b/MPa	σ_s/MPa	δ/%	ψ/%	a_{KU} /kJ·cm^{-2}
400	100	735	725	25.9	66.2	8.96
	300	725	720	26.3	66.0	8.67
	500	730	720	26.5	66.8	7.75
	1 000	745	730	23.1	62.3	2.71
500	25	745	735	24.1	58.6	—
	50	740	735	23.9	54.5	1.57
	100	735	720	24.8	55.3	1.25
	300	745	735	20.6	37.2	0.81
	500	735	720	20.6	40.0	3.49
600	25	740	735	16.4	33.0	—
	50	730	720	18.1	34.4	3.36
	100	735	730	17.7	36.0	2.61
	300	735	730	20.1	46.5	4.42
	500	725	720	21.8	45.1	4.88

和淬火状态相比，变化更小。相对延伸率在 200℃的整个时效时间内始终在 23%～24%范围内，而在 350℃时在 24%～28%范围内，断面收缩率为 60%～63%，冲击韧度则为 100 J/cm^2。

在 400℃时，合金的强度和塑性指标甚至在时效1 000 h以后，仍然保持在淬火合金的性能水平上。但是，时效 1 000 h之后，冲击韧度减少到 270 J/cm^2，这说明组织发生变化。时效温度增大到 500℃时，随着时效时间的增加，引起断面收缩率不断的下降与冲击韧度的急剧减小，在时效 300 h以后，冲击韧度达到了 8.1 J/cm^2。

在 600℃下导致合金脆化的过程发生在试验的头 25～100 h 期间。这时，合金的断面收缩率、相对延伸率和冲击韧度都降低了，当停留 300 h 和 500 h 的时候，塑性增大了，但是此时获得的 δ、ψ 和 α_H 值均比淬火状态的合金要小得多。

8.5　制造工艺和性能

1）热处理工艺和性能　TB7 合金可进行固溶和退火的热处理。对于大截面材料一般采用固溶处理（用较快的冷却速度冷却）。退火温度控制在 800～850℃范围。薄板、管材的真空退火温度为 750～800℃/h。

2）热变形工艺和性能

① TB7 合金的高温拉伸性能见表 7.4-234。

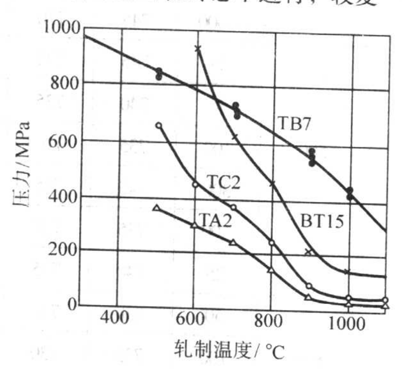
表 7.4-234　TB7 合金的高温拉伸性能

温度/℃	σ_b/MPa	δ/%	ψ/%
20	640	1.4	1.9
200	540	11.0	27.0
400	485	15.0	47.0
500	460	12.0	40.0
600	430	15.5	42.0
700	360	21.0	56.0
800	255	27.0	56.0
900	155	42.0	40.0
1 000	110	52.0	59.5
1 100	75	95.0	90.0
1 200	47	104.0	90.0

② TB7合金的变形工艺特性 Ti－32Mo合金是一种具有稳定的β组织的钛合金，具有良好的工艺塑性，但是铸态晶粒粗大，最好的开坯方法是采用三向压应力的挤压加工。一般开坯加热温度为1 100～1 200℃。当经过开坯破碎粗晶组织的材料，可在900～1 100℃范围内进行锻造（终锻温度不低于800℃）、模锻、轧制等加工，薄板、带和管材可冷加工或温加工，薄板和箔材的冷轧加工率达90%，一般控制在50%～70%。一般零件的板材冲压可在冷态下进行，较复杂的零件的冲压需要在热状态下进行。

在加工设备下料时，不允许火焰切割。零件可以用压力加工方法在冷态预热到150～300℃与在热态的600～700℃范围内来制造。在冷态冲压时，阴模必须预热到300℃。板材金属在冷态和热态的最小弯曲半径是三个坯料厚度。机体的弯板、卷管和由板料制造的其他类似零件，应在冷态材料的横向进行。

③ TB7板材轧制时的变形抗力见图7.4-50。



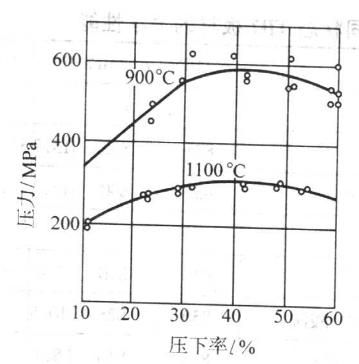


图7.4-50 TB7板材轧制时的变形抗力

3）TB7合金的焊接性能 用于纯钛的熔焊和接触焊也运用于Ti－32Mo合金。无论手工氩弧焊或是自动氩弧焊完成的该合金的焊缝，其强度极限均不小于基体金属强度极限的90%。表7.4-235列出了不同温度下焊缝金属与基体金属强度的比较。

表7.4-235 不同温度下焊缝金属与基体金属强度的比较

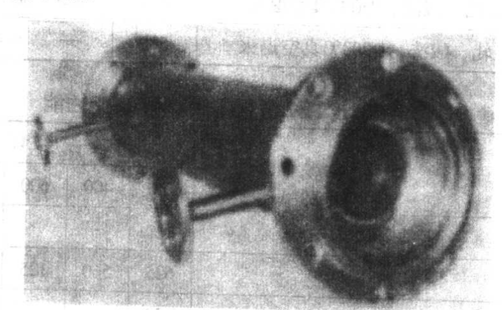
试验温度/℃	σ_b/MPa		
	基体（板厚4 mm）	焊缝	
		手工氩弧焊	自动氩弧焊
20	815	800	770
200	640	615	635
300	615	595	615
400	595	540	585
500	515	475	370
600	420	400	245
700	260	265	265
800	180	180	140

由焊缝金属与基体金属在沸腾盐酸中的腐蚀试验结果表明，焊缝金属与基体金属的腐蚀速度没有区别。

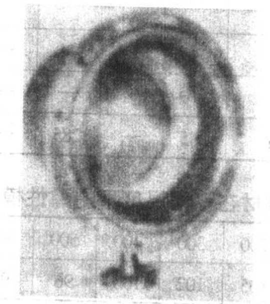
8.6 选材及应用

解决硫酸、盐酸等强还原性介质中的腐蚀问题一直是金属耐蚀材料中的重要的研究课题，Ti－Mo合金是迄今为止在还原性介质中最有价值的金属材料之一。由于Ti－32Mo合金在高温、中等浓度硫酸及盐酸中具有优异的耐蚀性，因此可以选用其作为一些化工设备，如精馏塔部件、合成树脂反应器的零件上使用（图7.4-51）。

为了改善TB7合金的力学性能，添加Zr、Nb制成Ti－32Mo－2Zr、Ti－32Mo－2Nb、Ti－32Mo－5Nb和Ti－25Mo－15Nb合金；为了改善其在氧化性介质中的耐蚀性，又研制出了Ti－32Mo－0.2Pd、Ti－30Mo－0.2Pd合金。这些合金较Ti－32Mo合金具有更好的性能，并获得了应用。



(a) 精馏塔上部(塔圈)



(b) 蒸发器上部



(c) 蒸发器下部

图7.4-51 TB7合金制造的精馏塔部件

9 Ti40钛合金

Ti40的名义成分为Ti－25V－15Cr－0.2Si，是高合金化的Ti－V－Cr系全β型具有自主知识产权的钛合金，含有25%的β稳定元素V和15%的β稳定元素Cr，对β相起固溶强化的作用。还含有0.2%的合金元素Si，起到改善蠕变性能的作用。Ti40钛合金名义成分的Mo当量为42.8，其主要性能特点是良好的抗燃烧性能和高温性能。该合金长时间工作温度在500℃左右。

Ti40钛合金将适合于飞机发动机关键部件的机匣和叶片，在航空航天工业将获得广泛应用。该合金在退火状态下使用，其主要半成品是板材、棒材、环材、锻件等。

9.1 化学成分

Q/XB 1526—2003《Ti40阻燃钛合金环坯》技术标准规定的化学成分见表7.4-236。

表 7.4-236　Ti40 钛合金化学成分（质量分数）　%

合金元素				杂质≤						
V	Cr	Si	Ti	Fe	C	N	H	O	其他元素	
									单个	总和
24～28	13～17	0.2～0.5	基	0.25	0.10	0.05	0.015	0.15	0.10	0.40

9.2　物理及化学性能

1）密度 $\rho = 5.18\ g/cm^3$

2）热导率见表 7.4-237。

表 7.4-237　Ti40 钛合金热导率

θ/℃	20	100	200	300	400	500	600
$\lambda/W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	5.6	7.9	11.0	14.2	16.9	19.1	20.2

3）比热容见表 7.4-238。

表 7.4-238　Ti40 钛合金比热容

θ/℃	100	200	300	400	500	600
$c/J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$	440	520	580	630	660	660

4）线胀系数见表 7.4-239。

表 7.4-239　Ti40 钛合金线胀系数

θ/℃	20～100	20～200	20～300	20～400	20～500	20～600
$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	9.06	9.35	9.65	9.97	10.27	10.5

5）磁性能　无磁性。

9.3　相变及显微组织

1）显微组织　合金在平衡状态下由 100%的β相组成。

2）再结晶温度　开始 790℃；结束 820℃。

9.4　力学性能

1）技术标准规定的性能见表 7.4-240。

表 7.4-240　技术标准规定的 Ti40 钛合金性能

室温拉伸				高温拉伸（540℃）				热稳定（500℃/100 h）		蠕变性能（500℃/100 h/250 MPa）
σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	δ_5/%	ψ/%	
≥										≤
900	830	8	12	750	600	12	25	4	6	0.1%

2）热稳定性　试样热暴露后的室温力学性能见表 7.4-241。

表 7.4-241　Ti40 钛合金试样热暴露后的室温力学性能

品种	热暴露条件		σ_b/MPa	δ/%	ψ/%
	θ/℃	MPa			
环材	未暴露		1 020	20	40
	500	100	1 075	10	18
	510	100	1 050	9	15
	520	100	1 050	7	11.5
	530	100	1 010	3	7.5

3）蠕变性能见表 7.4-242。

表 7.4-242　Ti40 钛合金高温蠕变性能

品种	状态	θ/℃	$\sigma_{0.1/100}$/MPa
环材	退火	500	250

9.5　热处理工艺

热处理工艺为：

棒材：800℃～830℃，0.5～1 h，水冷 + 540～560，5～8 h，空冷；

环件：840℃～860℃，1～2 h，水冷 + 540～560，5～8 h，空冷。

9.6　选材及应用

在航空发动机结构中，Ti40 将作为不易燃烧钛合金主要用于机匣和叶片等关键零部件。可望在 500℃左右的高温下长期工作。

编写：张　翥（北京有色金属研究总院）
张树启（西北有色金属研究院）
王庆如（北京航空材料研究院）
王金友（北京航空材料研究院）
朱知寿（北京航空材料研究院）
何　瑜（宝鸡有色金属加工厂）
魏寿庸（宝鸡有色金属加工厂）
赵永庆（西北有色金属研究院）

第5章　钛及钛合金应用

钛的应用始于20世纪50年代初，迄今约半个世纪。钛的应用是从航空开始的。高的比强度和良好的耐热性使钛成为一种重要的航空结构材料，并使钛首先在航空发动机上获得了应用。第一个使用的钛合金是Ti－6Al－4V（TC4）合金。这个钛合金就是目前世界上最广泛使用的钛合金。在航空应用中，钛的应用又是先从军用飞机开始的，当代最先进的飞机如战斗机F－15、F－22、F－117、轰炸机B1、B1B、直升机、大型军用运输机都是使用钛材较多的飞机。从20世纪60年代中开始，钛开始用于商业运输机。

在过去50年中，钛主要应用于四个领域：①航空（战机和民航机）和核潜艇，典型产品是航空发动机压气机盘和叶片、机翼、舰船壳体等；②化工、冶金、电力等民用工业部门，典型产品是大型化工压力容器、各类热交换器（板式、列管式、盘管式）和管道、泵、阀等；③医疗、体育及日常生活用品，典型产品是钛骨头、医疗器械、高尔夫球头、工艺品、炊具和眼镜架等；④建筑、汽车等主导产业部门和信息产业。目前，钛应用于体育馆、博物馆和城市雕塑等标志性高档建筑正成为一种时尚，钛在高档汽车发动机上用做阀门、弹簧已成为较成熟的技术，钛用做3C电子产品壳体或元件日益引人重视。

钛应用的广泛性可用图7.5-1表示。在21世纪，随着钛生产技术的成熟、成本的下降和社会各界对钛认识的深入，钛及钛合金的应用将越来越广泛。

在钛的诸多应用中，航空应用仍占主导地位。目前世界70%～80%的钛牌号和约50%的钛材量应用于航空领域。非航空的应用以工业纯钛为主，专用钛合金，如耐蚀钛合金、生物医用钛合金等品种比较少。不过，由于飞机数量有限，航空应用也有限。钛应用的总的发展趋势是非航空应用比例在增加。大力促进钛的非航空应用应是钛产业界和机械工程界的主要努力方向。

1　航空与航天用钛

1.1　钛在航空工业中的应用

1.1.1　钛在航空上的适用性和优势

钛与航空有着不解之缘。1910年，即世界莱特兄弟制造的第一架飞机问世后的第7年，用“钠法”（钠还原$TiCl_4$制取钛）获得了金属钛。1948年，钛登上工业舞台。钛材一出来，就首先应用于航空这种新型的高科技产业。1953年，在美国道格拉斯公司生产的DC－T机发动吊舱和防火壁上首次使用了钛材，从而揭开了钛航空应用的历史。多年来，航空一直是钛材的最大市场，目前全世界年产钛材约6万吨，其中50%应用于航空。

钛能在航空上广泛应用，是由于它有许多宝贵特性：

1）钛比强度高，有利于飞机减重。钛的密度比钢约轻40%，而强度与钢相当。钛的比强度优于一般航空用钛材和铝材。几种金属材料比强度的比较见图7.5-2。

2）钛的耐热性相当好，远胜于铝与镁。钛的熔点达1 668℃，比铁熔点高，比铝、镁熔点约高1 000℃，再结晶温度也高达600℃。因此，它的工作温度较高，适于发动机和机身温度较高的部位使用。钛也耐低温，不易产生低温脆性，钛的使用温区很宽。

3）钛的耐蚀性非常好，通常不需要特别的表面防护措施，维护方便，对舰载机、水上飞机及沿海地区服役的飞机十分有利。

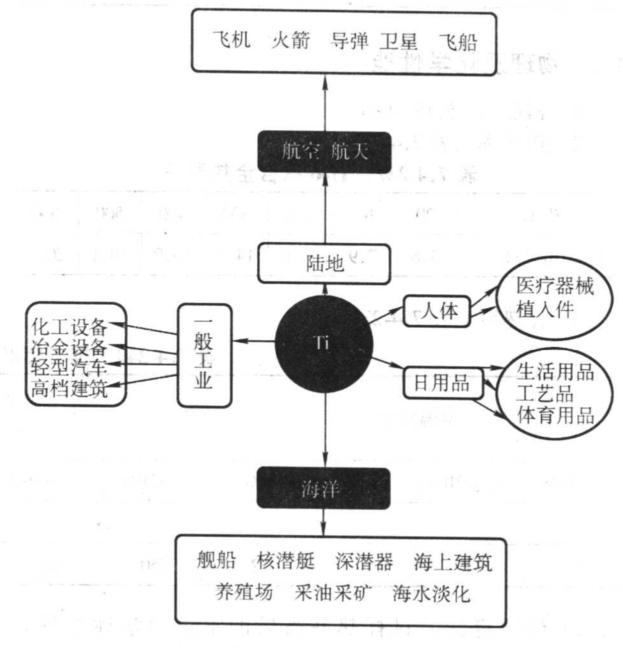


图7.5-1　钛的用途

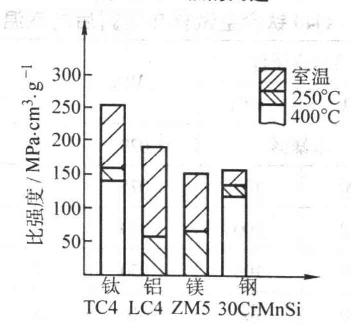


图7.5-2　几种金属材料在不同温度的比强度

4）钛的加工成形性也较好，可以满足飞机、发动机复杂、大型构件的加工成形要求。

5）钛的线胀系数和腐蚀电位与树脂基复合材料相近，有利于钛与复合材料配合使用。

6）钛的弹性好（σ_s/E大）和抗弹性能好等特性，也有利于钛的应用，如做弹簧构件、防弹装甲等。

钛在航空上的应用，包括在发动机、机体和机载设备上三方面的应用。本篇将介绍钛在发动机和机体中的应用。

喷气发动机是飞机的心脏。发动机的主要用钛部位示于图7.5-3。

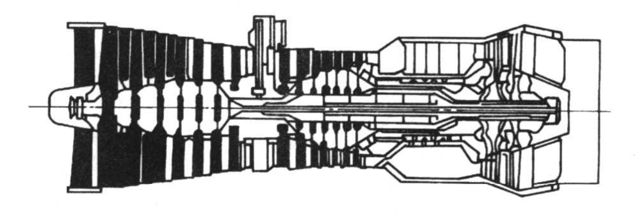


图7.5-3　航空发动机的主要用钛部位（涂黑部位）

航空发动机的主要用钛部位是发动机的压气机部分，其

中风扇、高压压气机盘件和叶片等转动件，不仅要承受很大的应力，而且要有一定的耐热性，即要求部件在300℃～658℃温度下有良好的高温持久强度、抗蠕变性和抗氧化性。这样的工况条件，对铝来说，温度太高，对钢和高温镍基合金来说，密度太大。专家指出，钢制的风扇叶片在高速运转中仅离心力的作用就难以承受，何况还有气动力，因而钛合金则是最佳的选择。

国际上在飞机发动机上普遍使用的钛合金有：Ti-6Al-4V、Ti-8Al-1Mo-1V、Ti-17、Ti-6242、Ti-6246、Ti-1100、IMI829、IMI834等两相钛合金和近α型钛合金，因为它们是耐热性较好钛合金。实践表明，常规钛合金只能用于650℃以下，为制造推重比10以上的先进发动机，需要开发以钛基复合材料和以Ti3Al、TiAl型金属间化合物为基的钛合金。

钛在飞机机体上的应用是飞机高速化、大型化、远程化的必然结果。飞机速度越快，即马赫数（M）越高，机体表面的空气动力加热越剧烈，飞行距离越长（航程越远），持续飞行时间越长，气动加热的效应也越显著，轻质高比强度和耐高温的钛合金成为目前机体优选的材料。

图7.5-4示出了航空材料的比强度与飞行速度（马赫数）和气动加热温度之间的关系。可以看出，当飞行速度大于2.2 M时，铝合金的耐热性已不能满足许多部件的耐热性要求。钛的熔点比铝高1 000℃，再结晶温度比铝高几百度，钛的耐热性远胜于铝。随着飞行速度的提高，钛的比强度优势越大。

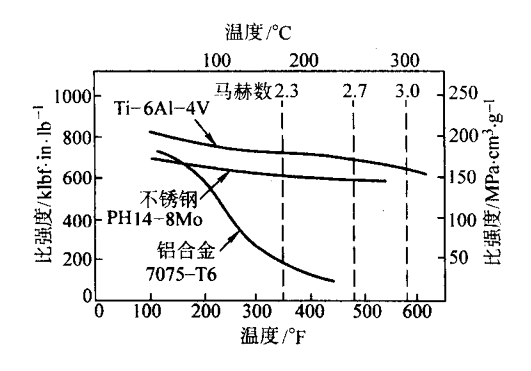


图7.5-4 比强度与温度的关系

1.1.2 航空钛构件的设计原则

根据长期的实践经验，航空钛构件的设计应遵循一些原则：

1）使用钛合金的部位主要是受热区、腐蚀严重部件、受力大的部位（通常需要合金结构钢的部位）。这样，可充分发挥钛合金高比强和耐蚀性好的优势。

2）钛合金部件的尺寸要考虑到国内钛材的实际供应能力和航空制造厂设备的加工能力。例如，钛锻件受钛合金锻造设备能力、毛坯供应能力、材质检验水平的限制；钣金件尺寸受热蠕变成形设备能力的限制。

3）钛合金件刚性差，回弹大，设计钛合金制件时要适当放宽公差、配合精度及最后精加工公差要求。要选择合适的壁厚，加大转弯处的转角R，非转角R不能太大，$R3$～$R5$较合适，以利于提高刀具的寿命，保证加工质量，从设计角度补偿钛合金工艺性欠佳的缺陷。

4）钛合金电极电位与不锈钢、石墨相近，但与铝合金相差较大，因此在设计时要充分考虑钛合金与铝合金接触腐蚀问题。接触面要涂密封胶如XM-31密封胶（高温区部件）或XM-33密封胶（非高温区部位）；铝合金与钛合金接触表面要严格清洗，并不得涂漆，否则密封胶涂敷效果差。

5）钛制金制件不宜用于摩擦大的地方，如转动轴衬、弹链箱等运动部件。钛合金与其他金属亲和力强，摩擦系数大，耐磨性差，容易产生磨蚀疲劳。对于无法避免钛合金构件摩擦的转动部件，应使用油、润滑剂等抗磨蚀剂，或对钛合金部件进行表面改性处理，增强其耐磨性。

6）要避免"镉脆"。在一定温度与应力下，钛合金与镀镉零件会发生作用，产生"镉脆"。因此，禁止钛零件与镀镉零件、标准件或工具接触。钛合金对镉脆的敏感性大于高强钢，在设计中应特别予以强调。

7）严格制定钛合金制件的表面处理规范。热处理工件一般应采用两次表面酸洗。在成形前，对毛料进行第一次酸洗去除表面氧化皮，以降低成形时开裂的危险；零件成形完毕后再进行二次酸洗，以去除成形和修整过程中的各种污染及高温成形过程中形成的氧化皮，保持钛零件的清洁度，保证以后装配、焊接不受污染物的影响。

8）钛合金构件的开敞要好，尽量减少闭角，最大限度地避免补加工。钛合金构件加工刀具不同于一般铝合金等构件的加工刀具，外场工作限制大，修边、钻孔都应备有专用刀具，设计时要考虑到这些特点，明示现场施工人员。

1.1.3 航空钛件的应用

（1）钛在航空发动机上的应用

航空发动机构件的主要特点：一是使用温度高，要求材料的耐热性（高温持久强度、抗蠕变性、抗氧化性和阻燃性）好；二是转动部件（盘件、叶片）要求断裂韧性、疲劳性能好，损伤容限高。

发动机的一个重要性能指标是"推重比"，即发动机产生的推力与其自身重量之比。推重比越高，发动机的性能越好。工作温度越高，发动机热效率越高。提高推重比，必须提高涡轮前进气的压缩比（进气量指标）与进气温度。提高推重也必须提高发动机材料高温下的比强度和比刚度，减轻发动机自身的质量。据计算，当压缩比达到15:1时，压气机的出口温度为590℃，而当压缩比达到25:1时，压气机的出口温度就达到620℃～705℃，需要耐热性非常好的钛合金。实验证明，常规钛合金（α，近α和α+β型钛合金）能用于600～650℃以下，为制造推重比10以上的先进发动机，需要开发钛基复合材料和以Ti3Al（α2型）、TiAl（γ型）金属间化合物为基的钛合金。

不大量选用钛合金作零部件，就不可能获得高推重比的发动机。美国第三代战斗机（F15、F16等）选用的动力装置是推重比为8左右的F100-PW100燃气涡轮风扇发动机，用钛量为25%～30%。第四代战机F-22选用推比10发动机。高推比发动机中，钛合金的用量已占发动机质量的25%～40%。国外用得最多的高温钛合金有IMI834（英）、Ti-1100（美）、BT35（俄）、Ti-6242S、Ti-6246、Ti-17、Ti-811和Alloy C（阻燃）钛合金。在我国，研究出了一种称为TD2（$Ti_3Al-Nb-Mo-V$）的Ti_3Al基合金，它可在600℃～700℃下长时工作，用做涡轮导风板和涡轮结合环。

下面简要介绍几种先进发动机的用钛情况

① V2500喷气发动机　V2500是英国、日本、美国、德国、意大利5国共同开发的涡轮风扇发动机。"V"字表示五个国家的意思，美国（普惠公司）负责高压涡轮、燃烧器，英国（罗罗公司）负责高压压气机；日本（航空发动机协会）负责风扇、低压压气机；德国和意大利负责齿轮箱。V2500是双轴涡轮风扇发动机，推力113 kN（2.5万磅力），发动机重2.2 t（4 942磅）。总体压缩比为36.5，它是先进材料技术、电子技术和加工技术的集成。具有低油耗、低噪音等特点，节油率达14%。

V2500发动机的用钛量达31%。最大的钛合金部件是风扇机匣，直径1 700 mm，长1 150 mm，前壳体与后壳体分开

制做，最后用激光焊接成一个整体。风扇盘、压气机盘、圆形护环、轴承支座、压气机叶片等都采用钛合金。大都为Ti-6Al-4V合金。在高压压气机的3~6级，因温度较高，使用IMI550钛合金（Ti-4Al-4Mo-2Sn-4.5Si）。该合金添加了Si元素，抗蠕变性能优良。

V2500涡轮风扇发动机的低压压气机盘（最大直径900 mm）和风扇外壳，采用三次真空熔炼的Ti-6Al-4V。

空客A320和MD-90等民航机采用V2500发动机。估计这种发动机订货量在15年内将达到5 000台。在生产过程中，发动机将不断改进，其推力也会不断提高，计划由113 kN提高到149 kN，以适应180座大型远程客机发展的需要。

② GE90发动机　美国PCC公司制造的GE90发动机风扇机匣，直径达2 m，是世界最大的精密钛铸件。典型的钛精铸件有Ti6242整体精铸机匣，整体精铸Ti-6Al-4V定子，风扇框架和发动机支承件。

③ 推比15~20涡扇发动机　美国综合高技术性能发动机技术计划（IHPTET）提出，要在2020年前后研制出推重比15~20涡扇发动机，装备高性能的军机。该机可在21 000 m高空飞行，M数3~4，载弹量1 t，作战半径1 850 km。该计划涉及的钛合金材料见表7.5-1。

表7.5-1　美国IHPTET计划中推重比15~20发动机用钛材

系统	钛材	技术指标	使用部位
压气机	TiAl化合物	704~982℃	叶片、机匣、非承力件
压气机	纤维/TiAl复合材料	1 704~982℃	无盘转子、空心叶片
喷管（无冷却）	TiAl基复合材料	>982℃	承温结构件
燃烧系统	钛基合金	>650℃	机匣

从表7.5-1可以看出，在未来的先进发动机中，TiAl基合金及其复合材料占有重要地位。用TiAl基复合材料制造的无盘结构压气机转子（鼓筒式转子）同现有压气机转子相比，将减重20%。

航空发动机用的钛材主要是钛锻件（饼材、环材）和棒材。锻饼用做发动机压气机盘件，棒材用做压气机叶片，环材用做机匣。另外，机匣也常采用精密铸造工艺生产。

国外几种军用航空发动机的用钛情况见表7.5-2，我国军用航空发动机的用钛量见表7.5-3。

表7.5-2　国外军用航空发动机的用钛情况

发动机型号	配用飞机型号①	单台发动机用钛量/t
F100-PW-220/229	F-15（2）F16（1）	2.86
F110-GE-129	F-15（2）F16（1）	2.36
F404-GE-400	F-18（2）	1.81
F117-PW-100	C-17（4）	3.86
RRpegasus	AV-8B（2）	0.99
T700-GE701	AH-64A（2）	0.09
F110-GE-400	F-14（2）	2.36
TF39-GE-1C	C-5B（4）	4.45
F101-GE-102	B-1B轰炸机（4）	1.95
T64-GE-416	CH-53E（3）	0.32
T700-GE-700	S/UH-60（2）	0.09

① 括号中的数字为飞机选配的发动机台数。

表7.5-3　国产航空发动机用钛情况

发动机	钛部件	使用的钛合金
WP-6	盘　叶片　机匣	
WP-7	盘　叶片　机匣	ZT4、TC1、TC4、TC6、TC2
WP-13	盘　叶片　机匣	TC11、TC4、TA7、TA6、TC1、TC2A
	原喷口　液压作动筒	TC6、TT3、ZT4
FWS-9	盘　叶片　机匣	

发动机的质量约占军机正常起飞质量的1/6。

（2）钛在机身上的应用

“结构质量系数”（飞机自重与起飞质量之比）是飞机设计特性的重要表征。结构质量系数越小，飞机越先进。例如，美国第三代战机的结构质量系数为33%~34%，第四代战机（F-22）的结构质量系数则降低到27%~28%。

飞机机身用钛主要是利用钛的低密度、高比强特性，也利用了它有较好的耐热性、耐蚀性和它与复合材料的良好相容性。

国外飞机用钛情况见表7.5-4。由表7.5-4可见，目前商用客机中用钛最多的是波音747-400，用钛量达38 t/架；运输机用钛量最大的是C-17，用钛34.5 t，轰炸机用钛量最大的是B-1B，用钛量达90.5 t。表7.5-4将详细介绍军机和民机用钛情况。

表7.5-4　钛在国外各种机型上的用量　　t

公司	飞机型号	选配发动机型号①	骨架用钛量	发动机用钛量	用钛总量
空中客车公司	A300-600	CF6-80C2（2）	2.77	3.13	9.03
	A300-600	PW4000（2）	2.77	4.89	12.56
	A310-200/300	CF6-80A1（2）	2.77	2.63	8.02
	A310-200-300	PW1000（2）	2.77	4.89	12.56
	A320/A321	CFM56-5（2）	7.44	1.49	10.43
	A320/A321	1AEV2500-A（2）	7.44	1.49	10.43
	A330	CF6-80（2）	8.62	3.13	14.88
	A330	PW4000（2）	8.62	4.89	18.42
	A340	CFM56-5C2（4）	11.79	1.49	17.78

续表 7.5-4

公司	飞机型号	选配发动机型号[1]	骨架用钛量	发动机用钛量	用钛总量
波音公司	737－200	JT－8D－15/17（2）	1.72	1.27	4.26
	737－300/400/500	CFM56－3B－（2）	1.81	1.498	4.81
	747－200/300/400	CF6－80（4）	18.59	3.13	31.12
	747－200/300/400	PW4000（4）	18.59	4.89	38.19
	747－200/300/400	RB211－524（4）	18.59	2.72	29.48
	757	PW2037（2）	8.89	2.90	14.69
	757	RB211－535（2）	8.89	2.04	12.97
	757	PW2040（2）	8.89	3.22	15.33
	767－200/300/400	CF6－8Q（2）	5.39	3.13	11.66
	767－200/300/400	PW4000（2）	5.39	4.89	15.19
	767－200/300/400	RB211－524H（2）	5.39	2.72	10.84
麦道·唐纳	MD－80系列	JT－8D－209/217/219（2）	1.36	2.45	6.26
		1AEV2500－D5（2）			
	MD－90	CF6－80C2（3）	1.36	1.49	4.35
	MD－11	PW4000（3）	10.75	3.13	20.14
	MD－11	F100－PW－220/229（2）	10.75	4.89	25.45
	F－15	F110－GE－129（2）	23.27	2.86	28.99
	F－15	F404－GE－400（2）	23.27	2.36	27.99
	F－18	F117－PW－100（4）	4.35	1.81	7.98
	C－17	RRpegasus（2）	1.91	3.86	34.47
	AV－8B	T700－GE701（2）	1.59	0.99	3.58
	AH－64A		0.45	0.09	0.64
通用电气公司	F－16	F100－PW－220/229（1）	0.82	2.86	3.67
	F－16	F110－GE－100/129（1）	0.82	2.36	3.18
格鲁曼公司	F－14	F110－GE－400（2）	18.78	2.36	23.49
洛克希德公司	C－5B	TF39－GE－1C（4）	6.85	4.45	24.63
罗斯克维尔公司	B－1B轰炸机	F101－GE－102（4）	82.65	1.95	90.45
西科尔斯基公司	CH－53E	T64－GE－416（3）	7.85	0.32	8.79
	S/UH－60	T700－GE－700（2）	1.91	0.09	2.09

① 括号中数字为每架飞机配用的发动机台数。

1）军机用钛情况　国外先进战机的用材情况示于表7.5-5。由表7.5-2可见，在飞机结构中，钛合金与树脂基复合材料的用量是逐渐增加的。美国的第三代主力战机F－15和第四代主力战机F－22的用钛量分别达27%和41%，复合材料的用量分别达2%和25%，而传统航空材料铝的用量分别下降到36%和11%。在超音速巡航的第4代战机F－22上，钛已超过铝，成为第一结构金属，这代表了军机用材的发展方向。

表7.5-5　国外先进战机的用材情况　%

机种	设计年代	钛合金	结构钢	铝合金	复合材料
苏－27（重型）	1969	17	10	60	—
F－14	1669	24	17	39	1
F－15（重型）	1972	27	6	36	2
F－16（轻型）	1976	3	3	65	3.4

续表 7.5-5

机种	设计年代	钛合金	结构钢	铝合金	复合材料
F－18	1978	13	8	44	10
F－117（隐身）	1983	25	5	20	10
F－22（重型）	1989	41	5	11	25

每架F－15战斗机机身需要消费23 t钛材，它配的2台发动机需要消费4.5 t钛材，每架飞机约用28 t钛材。

每架F－22战斗机，机身需消费36 t钛材，它配的2台F－119发动机，需消费5 t钛材。美国计划到2011年，共生产278架F－22战斗机，由此可推算，为生产F－22飞机及备用的发动机，可能需要消费近10 000 t优质钛材。这些钛材主要是Ti－6Al－4V ELI和Ti－62222两种钛合金。F－22战机的主要用钛部位见图7.5-5。

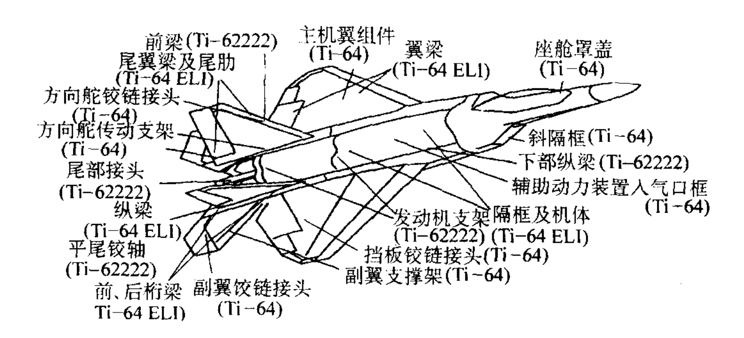


图 7.5-5 F-22 战机的主要用钛部位

应该指出的是，人们熟悉的 F-16 用钛量很少（3%），这主要是因为它是一种小型（单发单座）、“廉价”战斗机，它的价格比重型的 F-15 低一半，它是与 F-15 搭配使用的战斗机。虽然它的性能很不错，但与 F-16 不完全是同一档次的飞机。

我国在飞机上采用钛合金是从歼七战斗机开始的。主要用于发动机舱的隔热结构。在 J8 原型机、Y7、Y8 上用钛也是如此：从 1981 年开始，我国开始研制钛合金（TC4）大规格棒材和重要飞机承力构件。在 J8Ⅱ飞机 58 框、重尾接头等成功地使用了钛合金。J8Ⅱ机身用钛量达到 3.97%，减重 17.69 kg。从上世纪 90 年代开始，我国在 J10，J11 的研究中，更多地使用钛材，使我国航空用钛达到了一个新水平。我国飞机机体上已使用了 TA2、TA3、TC1、TC3、TC4、Ti-1023、Ti-15-3 等多种钛合金。使用的部分有后机身蒙皮、垂直尾边的加强框、垂尾接头、鸭翼转轴梁、58 框复鳍接头等。

表 7.5-6 示出了钛在国外某些战机机身各部位上的使用情况。

表 7.5-6 钛在飞机机身上的应用

机种	钛合金结构质量/kg	占结构总质量比例/%	使用部位
F-14 变后掠战斗机	3 130	25.4	中央翼盒，机翼转轴，进气道框架，主后机身桁条，发动机支承梁，蒙皮，阻力支臂
F-15 重型战斗机		26.5	机身隔框，翼梁，后机身，液压导管，主起落架舱门，发动机喷口整流板，龙骨连接板
F-16 轻型战斗机		3	垂尾接头，水平尾翼扭力肋构件
F-18 舰载战斗机		12	纵梁，制动钩支承接头
狂风变后掠战斗机		16	龙骨，蒙皮，襟缝翼滑轨
幻影 2000 战斗机	1 800	21（23）	机翼臂板，机身隔框
幻影 4000 多用途战斗机	1 800	21（23）	
美洲豹虎攻击机			龙骨，襟缝翼滑轨，支柱
鹞式垂直起落战斗机	182	5	起落架，机体蒙皮，中应力零件，隔板，水箱
CH-35C 运输直升机	803	8.5（10）	主旋翼桨毂，旋翼
山猫多用途直升机			尾桨毂，齿轮箱配件
B-1 超音速战略轰炸机	1 000	8.5	辅助动力装置舱门，发动机矩舱隔框，接头，进气导管
C-5A 大型军用运输机	3 495	6	襟缝翼滑轨，发动机支架，起落架支架，高压导管，连接管
HIMAT 高机动遥控研究机		18	发动机喷管，机翼中部和机尾接头部位，前机身的几个隔框

2）**民航机用钛情况** 世界几种主要干线飞机情况及用钛量见表 7.5-7。

由表 7.5-7 可见，在民航机中，最先进飞机的用钛量为 9%。虽然用钛比例比先进战机要低些，但因为民航机的体积和重量要大一些，每架飞机的用钛量仍是相当可观的。还应注意的是，飞机部件是非常精巧的深加工部件，飞机钛材的购买量平均约为飞机零件重量的 7 倍，即材料坯料与飞行零件质量之比大致为 7:1。在估计钛的航空市场时，一定要考虑到这个因素。

典型用钛部位见表 7.5-8。

表 7.5-7　大型民航机的用钛情况

国家与公司	飞机	首飞年代	用钛量/%	水平
美国波音	B707	1957	0.2	第一代，近中程 100 座
	B777	1967	2.2	第二代，近中程 100～149 座，宽机身
	B747－100	1969	2.4	第三代，中远程 250～412 座，宽机身
	B757	1982	5	第四代，近中程 150～186 座，宽机身
	B767	1982	1.8	第四代，中远程 187～250 座，宽机身
	B777	1994	7～9	第五代，中远程 350 座以上，宽机身
空客公司	A300	1972	5	第三代，中远程 250 座以上
	A310	1982	5	
	A320	1987	6	
	A340	1983	6	第四代，中远程 251～350 座，宽机身
	A330	1993	5	
	A380	2004	9	第五代，中远程 555～800 座，宽机身
俄罗斯	Tu－154	1968	2	第二代，近中程 150～180 座
	Tu－204	1990	9	
	Tu－334	1997	9	

表 7.5-8　大型民航机的典型用钛部位

机种	钛合金结构质量/kg	占结构总质量%	使用部位
波音－747 远程客机	4 536 (3 852)	5.5 (4.5)	起落架支承梁，襟缝翼滑轨，发动机，支架零件，高压导管，连接件，门与窗的加强板
波音－767 中程客机		2	座舱窗框，接头，液压导管
L－1011 三星中程客机	4 500	4.5	机身尾部防震支架，中央发动机支架，吊舱挂架，盒形结构
A－300B 宽机身短程客机	1 000		襟缝翼滑轨，发动机，安装支柱，机翼侧向加强肋
协和超音速客机	1 400	2	发动机推力轴颈，发动机舱零件，前舱门，刹车装置抗扭管，安定面控制装置，机翼前缘，函道，连接环，控制枢轴，接头，操纵系统支架，继电器支架
图－144 超音速客机	5 900	18	发动机短舱

飞机钛零件大多为钛棒和厚板制成的锻件或机加工件。为减少焊缝和连接件的数目，提高钛部件的整体性，近年来，大型钛等温锻件与精密铸件的比例在不断增加。减少零件的数目，既有利于减重，也有利于减少加工量，减少装配时间，降低生产成本和提高安全可靠性。

3）波音 777 和空客 A380　美国的波音公司和欧洲的空中客车公司是世界上最大的民用飞机制造公司，它们每年能生产 200～300 架民航机，下面拟分别介绍了这两家飞机的用钛情况。

① 波音 777 用钛　波音飞机是世界上商业开发最成功的飞机。在波音系列飞机中，从波音 707 到 727、737、747、757、767 到 777，都使用了钛材，其钛材使用比例是逐渐提高的，如图 7.5-6 所示。波音 707 飞机用钛量仅占自重的 0.3%，波音 757 飞机用钛量仅占自重的 5.7%。

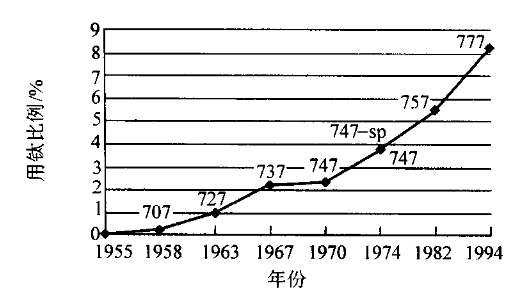


图 7.5-6　钛材在波音飞机上的使用比例

在波音系列客机中，B－747 是最大型的客机，而 B－777 是技术最先进的客机，也是用钛比例最高的客机。目前，美国正在开发一种称为 7E7 的‘梦幻飞机’，它具有安全、舒适、豪华、省油等特点，也使用了大量钛材。

波音 777（B777）是美国 20 世纪 90 年代研制的双发宽体客机，是 1995 年投入营运的大型干线客机，是最先进的实用客机。

在波音 777 中，钛合金用量占飞机总质量的 7%（9.4%），在飞机自重中钛构件的质量达 22.4 t，所需钛材量达 226.8 t。

在波音 777 中大量用钛的原因是：用钛合金代钢，可显著减小结构质量；用钛代铝，可减小零件体积；钛与碳纤维复合材料有良好的相容性，而波音 777 是大量使用复合材料的飞机，复合材料的用量达 15%。

在波音 777 上，共用了五种钛合金 Ti－1023、Ti－64ELI、Ti－15－3、β21S 和 Ti－6242。钛合金在波音 777 上应用情况见表 7.5-9。波音 777 上用钛的一个特点是大量使用 β 钛合金。使用部位见图 7.5-7。

表 7.5-9　钛合金在波音 777 型飞机中的应用

钛牌号	状态	σ_n/MPa	形式
工业纯钛	退火	345～550	板、棒
Ti－3Al－2.5V	CWSR 退火	860 690	液压管 蜂窝板
Ti－6Al－4V	退火 β退火 STA	895 895 1 100	各种材料 锻件 紧固件
Ti－10V－2Fe－3Al	STA	1 190	锻件
Ti－15V－3Cr－3Al－3Sn	STA STA	1 035 1 140	薄板 铸件
Ti－3Al－8V－6Cr－4Mo－4Zr	冷拉＋时效	1 240～1 450	弹簧
β－21S	STA	≥860	带板
Ti－15Mo－2.7Nb－3Al－0.2Si			

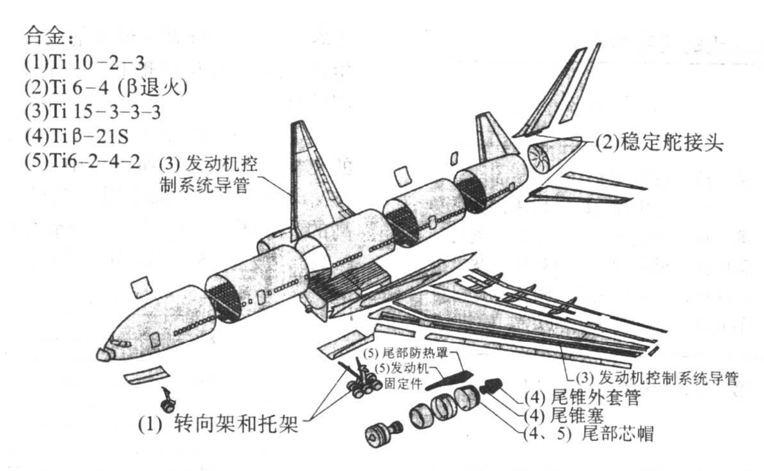


图 7.5-7　波音 777 飞机用材示意图

在波音 777 上，高强高韧性 β 钛合金 Ti-1023 用做主起落架关键承力构件。它是一种新结构的三轴起落架，能使飞机在较短跑道起飞。在主起落架中最大件是转向架横梁，它的直径 330 mm，长 3 m。这是最大的钛单体件和最具有挑战性的。用 Ti-1023 代替高强钢做主起落架，既可大大减重，又可避免腐蚀问题。

采用 β 退火的 Ti-6Al-4V 合金材而不用普通工厂退火的 Ti-6Al-4V 合金材是 B777 用钛的一大技术特色，目的在于提高该材料的损伤容限。

β-21S 钛合金代替镍基合金做飞动机的衬套和喷嘴，可以减轻排气结构的质量。β-21S 的抗氧化性好，工作温度可达 590℃，它对液压油有很强的耐蚀性，因此也用它代替钢和镍合金制造短舱结构。液压油高温下会分解，形成有腐蚀性的有机磷并可能使钛产生‘脆氢’。β-21S 对这些都有很强的抵抗能力。发动机尾部整流罩和排气组件也用 β-21S 合金薄板制造，这不仅因为它耐热、抗氧化，而且它有良好的成形性。

冷成形优良的 Ti-15-3 β 钛合金在 B777 上用做弹簧和管道。Ti-15-3 合金主要半成品为带板。每架飞机需 ϕ178 mm送气管道 70 m。用它代替工业纯钛做飞机控制系统中高温（230℃）输气管道，可以减少管壁厚，显著减重。

在波音 777 中，需要约 18 000 个螺母夹（其中地板结构就需要 9 000 个）。用 Ti-15-3 合金铸件代替强度相当的 17-4PH 铸钢件，可显著减重。

波音 777 上钛材的选择和使用技术经验将对未来钛在航空上的应用将产生深刻的影响。

② 空客公司 A380 飞机　在 20 世纪 70 年代，在欧洲成立了空中客车航空制造厂。空客公司以法、德为核心，有英国、西班牙、荷兰参与。空客公司开发 A3××系列飞机，如 A330、A340 等，向美国波音飞机公司发起了挑战。近几年来，空客公司又向新的高度攀登，大力开发 A380 飞机。A380 是未来的空中‘巨无霸’，重 560 t。它长 73 m，比 B-747 长 14 m，宽展 80 m，有 7 层楼高，舱内空间足以容纳 20 辆双层公共汽车。A380 可载客 555 名，并可扩容到载客 840 人；A380 犹如一个五星级的‘飞行酒店’。A3××系列飞机的用钛情况见图 7.5-8 。由图 7.5-8 可见，A380 是其中用钛比例最高的飞机。

图 7.5-9 示出了 A380 飞机用钛的部件。

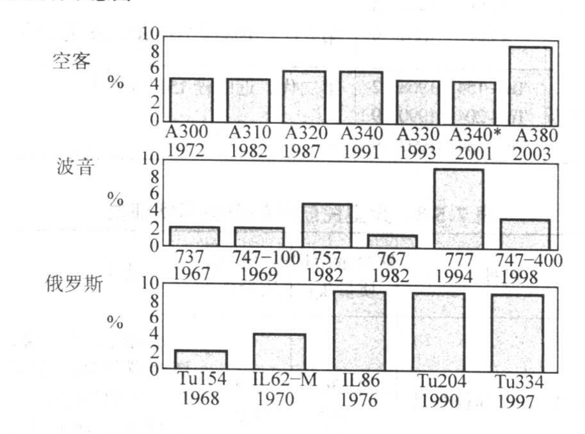


图 7.5-8　民用客机用钛量比较



图 7.5-9　A380 飞机用钛部位

A380 飞机的起落架是 Ti-10-2-3 合金制造的，最大质量达 3 200 kg，是迄今为止，最大的航空锻件（图 7.5-10）。它是用世界最大的锻压机（75 000 t）制造出来的。

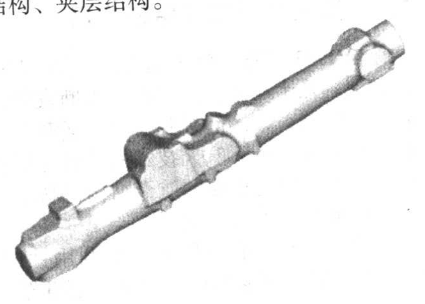
1.1.4　钛近净成形技术在飞机上的应用

1）钛合金 SPF/DB 技术的应用　钛合金如 Ti-6Al-4V 合金具有良好的细晶超塑性特性，而且它的超塑性成形温度与扩散连接温度很吻合，因此在航空上钛合金的超塑成形常与扩散连接结合应用，形成钛合金独特的超塑成形/扩散连接（SPF/DB）技术。利用这种技术可以制造出精巧、复杂形状的整体航空结构。SPF/DB 可以制造出空心构件（如空心叶片）。与常规机加工构件或焊接构件相比，可减少零件数量，减重 15%～40%，节省工时，降低成本 30%～50%，并提高飞机结构的疲劳寿命和抗腐蚀性能。

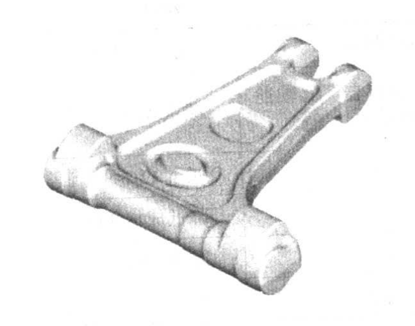
钛合金 SPF/DB 组合工艺按流程可分为两类：①先 DB 后 SPF，适于扩散连接部位较多的大型复杂构件，又防止被连接表面污染，简化模具结构，保证获得较高的扩散连接质量，此方法的缺点是必须在成形部位预先涂敷上焊剂，对模具的密封要求较高。②先 SPF 后 DB，即零件成形后，再扩散连接，它适于小型简单构件，此法的缺点是构件内表面易被污染，可能影响连接质量。

钛合金 SPF/DB 组合工艺按结构特点可分为三类：加强

板结构、整体加强结构、夹层结构。



轮廓尺寸：4225mm×570mm×690mm
质量：3210kg



轮廓尺寸：1726.9mm×1694mm×391mm
质量：1090kg

图 7.5-10 A380 飞机的钛合金起落架

钛合金 SPF/DB 所需的主要设备有：专用 SPF/DB 机床、酸洗槽、高压水切割机或激光切割机、测厚仪、氩弧焊机、焊箱及模具等。

钛合金 SPF/DB 主要工艺参数有压力、温度、时间等。Ti－6Al－4V 合金在 900℃～925℃下最适于 SPF/DB 要求。压力一般为 0.98 MPa～1.2 MPa，时间为 40 min，温度过高和时间过长，会造成晶粒粗大，影响产品力学性能和光洁度。

钛合金 SPF/DB 适用的典型飞机构件有：发动机整流罩、整流包皮、风外加强筋蒙皮、整体隔框、翼肋、波纹板、加强板、舱门、口盖等。典型件照片见图 7.5-11。

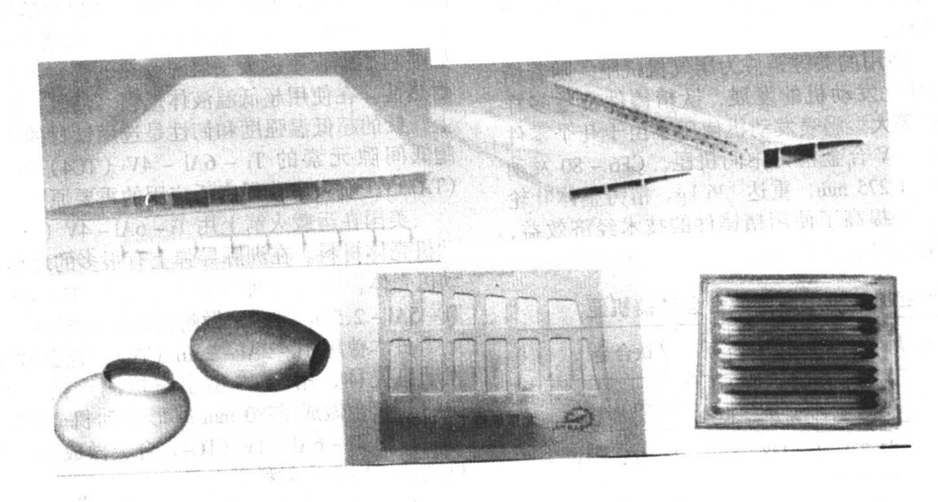


图 7.5-11 钛合金 SPF/DB 典型件照片

国外飞机应用钛合金 SPF/DB 构件情况见表 7.5-10，国产飞机上应用的钛合金 SPF/DB 件，有飞机的框锻件、舱门、电瓶罩、发动机维护口盖、空调舱口盖等，取得很好的技术经济效益。例如，某飞机的舱门用钛合金 SPF/DB 件代替铝合金铆接件，零件数量由 52 件减少到 22 件，紧固件由 840 个减少到 103 个，减重 15%，降低成本 53%。。

表 7.5-10 国外飞机应用钛合金 SPF/DB 构件情况

机种	应用部位	主要经济指标
F－14 战斗机	前置翼	减重 10%，降低成本 25%
F－15 战斗机	隔热板 后机身上部 主起舱门、整流片	减重 10%，降低成本 40% 减重 72.6 kg
B－1B 轰炸机	风挡热气喷口、短舱隔框、舱门	减重 50%，降低成本 40%
YAH－64 直升机	防火隔板	减重 10%，降低成本 40%
T－38 教练机	主起落架舱门	
B－1 轰炸机	短舱框架、舱门	减重 31%，降低成本 50%

续表 7.5-10

机种	应用部位	主要经济指标
F－18 战斗机	舱门、防火墙	
Bae125 行政机	应急舱门	减重 10%，降低成本 30%
EAP 战斗机	前置翼、前缘缝翼、龙骨梁	
狂风战斗机	进气道、后机身下整流片、框架发动机、隔热罩、热交换器导管	减重 10%～20%，降低成本 30～50%
幻影战斗机	垂直尾翼、机翼前缘延伸边条	减重 12.5%
阵风战斗机	前缘缝翼	减重 45%，降低成本 40%
雅克 42 客机	发动机检修舱门	减重 1.2 kg，降低成本 53%
A300 客机，A310/320 客机	前缘缝翼收放机构外罩	减重 10%

续表 7.5-10

机种	应用部位	主要经济指标
A330 客机，A340 客机	机翼检修口盖、驾驶舱口盖、各种检修口盖	减重 46%
AV8B 客机	检修口盖	减重 12%
ATP 直升机	检修舱门	降低成本 40%
A6-E	进气道隔板	减重 10%
YC-17	机翼后缘襟翼蒙皮	

2）钛合金精铸技术的应用　钛合金具有较好的铸造性能，钛合金精铸件采用热等静压处理后，机械性能的稳定性和疲劳性能大大改善，具有足够的安全可靠性，因而在航空上越来越广泛地应用。

① 发动机　发动机是最早使用钛精密铸件的。美国F100发动机首先装配了27个钛铸件，后来增加到130个，其中最大的是轴承壳体，其他都是些支架、接头、转接圈等小零件。这些零件受力不大，大多是在技术条件安全等级中属二、三类铸件。它们的重量不大，但使用数量多。目前，一些先进发动机中钛铸件用量达近1 000个，对发动机的减重具有举足轻重的地位。

发动机上最普遍使用的关键铸件为压气机机匣。随着精铸技术的进展和高推比发动机的发展，钛精铸件日益多样化、大型化。RB199等大型涡喷发动机使用了由十几个零件拼合的整件Ti-6Al-4V合金精铸中间机匣。CF6-80发动机的中间机匣直径达1 275 mm，重达136 kg。精铸整体叶轮也获得了应用，进一步提高了使用精铸件的技术经济效益，国外精铸机匣应用的情况见表7.5-11。

表 7.5-11　航空发动机用大型钛合金精铸机匣

发动机型号	精铸件名称	尺寸/mm	重量/kg	钛合金
RB199	中间机匣	ϕ740	48	Ti-6Al-4V
CF6-80	中间机匣	ϕ1 275	138	Ti-6Al-4V
GE101	中间机匣	—	—	Ti-6Al-4V
PW-2037	中间机匣	ϕ1 020×324	107	Ti-6Al-4V
F100	中间机匣	ϕ860	54	Ti-6Al-4V
P-W2037	压气机匣	ϕ686×470	82	Ti-6Al-4V
—	压气机匣	ϕ710	71	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo
T700	压气机匣	ϕ280	10	Ti-6Al-4V
PW4000	压气机匣	ϕ854×482	72	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo
CFM-56	压气机匣	ϕ724×430	115	Ti-6Al-4V

② 飞机机身　在飞机机身上应用的典型钛合金精铸件有飞机襟翼滑轨、发动机的安装吊架和飞机变速装置都是大型复杂的承力构件。

V-22飞机的变速装置原为43个零件和536个紧固件组成，其加工与装配的工时超过1 000 h。通过新设计，改用精铸之后，只采用了三个精铸件与32个紧固件，总工时减少62%，显著降低了制造成本。经过热等静压处理之后，铸件性能很好，结构设计所取的铸件系数为1。

1.2　钛在航天工程中的应用

自1957年第一颗人造卫星上天以来，人类进入了航天新时代。几十年来，航天技术不断发展，出现了许许多多的航天飞行器，如洲际导弹、卫星运载火箭、宇宙飞船、空间站及航天飞机等。航天技术的发展与新材料技术的发展密切相关，金属钛是重要的航天结构材料之一。钛在各种航天飞行器中都获得了重要应用。

钛在航天中的应用主要是利用钛的低密度、高比强特性，也经常利用它的耐热性和耐超低温的性能，有些应用也与钛的耐蚀性（对火箭燃料的耐蚀性和相容性）和低膨胀、低热导率物理特性及形状记忆功能有关。

1.2.1　钛在运载火箭中的应用

运载火箭是发射洲际导弹、人造地球卫星及宇宙飞船的工具。火箭的性能常用质量比（即推进剂质量与火箭总质量之比）来表征。这个比值越大，火箭性能就越好。这意味着，要尽可能减小火箭机体的质量。因此，火箭需要采用高比强的材料。

诚然，火箭对钛材料的要求是多方面的，重要的还有材料的延性、韧性和缺口敏感性。对长筒形的薄壁构件来说，刚性也很重要，它取决于材料的纵弹性模量，这是材料的固有性质，在选材时也要充分考虑。火箭发动机的某些部位，如喷咀周围，重返大气层时受热的密封容器，需要有良好的耐热性。在使用超低温液体燃料（液氢、液氧）的液体火箭上，钛的超低温强度和韧性是选用钛材的决定性因素。这是超低间隙元素的Ti-6Al-4V（TC4）和Ti-5Al-2.5Sn（TA7）在航天中获得广泛应用的重要原因。

美国在运载火箭上用Ti-6Al-4V（TC4）做一级火箭发动机壳体材料。在洲际导弹上有很多的球形和椭球形的钛发动机壳体。在大力神导弹上，还用Ti-6Al-4V（TC4）和Ti-5Al-2.5Sn（TA7）做耐低温的氦容器。

日本曾用Ti-2Al-2Mn（TC1）合金做成ϕ480 mm球形发动机壳体，用于4S型宇宙探测火箭；用Ti-2Al-2Mn（TC1）合金做成ϕ780 mm球形发动机壳体，用于发射人造卫星；用Ti-6Al-4V（TC4）合金做成ϕ1 130 mm球形发动机壳体，用于发射科学卫星。

在火箭上用钛的部位还有翼的前缘部位、喷咀的夹持器、多级火箭的断开接头部位等。一级火箭球形发动机壳体是用冲压工艺制造的，即将钛合金板材通过热冲压加工成半球形毛坯，通过锻造和环轧工艺加工出环材，然后进行机加工和热处理，最后用氩弧焊接工艺，将半球组合成球形容器。

俄罗斯航天火箭使用钛合金的比例占其质量的5%～30%，OT4合金通常用于制造液体火箭发动机燃烧室和飞船对接件；OT4-1合金用于制造悬挂发动机和燃料箱用的构架，以及管接头和托架形式的紧固件。

“维纳斯”返回飞行器大约96%的结构件是用钛合金制造的。

“能源”号运载火箭使用了强度极限1 100 MPa，重3.5 t的BT23合金大型模锻件和锻件，还使用了BT5-1、BT6和BT23（强度极限1 300 MPa）合金的焊接球罐以及用高强钛合金管材制造的管结构件（构架）。每枚“能源”号火箭使用钛合金结构件的质量达18 t。

由于钛加工技术的发展，Ti_3Al基合金也已成为实用的宇航发动机材料。我国开发的TAC-1型Ti_3Al基合金已代替不锈钢用于某型号火箭发动机的涡轮壳体。TAC-1合金的典型性能见表7.5-12。

表 7.5-12 TAC-1 合金的性能

温度/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	密度/g·cm^{-3}	E/GPa
室温	1 058	795	8~15	—	4.85	110~145
650	748	550	22.9	25.9		
700	663	539	16.9	29.4		

TAC-1 合金的名义成分为 Ti-24Al-14Nb-3V-0.5Mo（摩尔分数），其平衡组织为 α_2 相、β 相和 O 相组成，为即 $\alpha_2+\beta+$O 三相合金。O 相的数量及其形貌控制是获得优良综合性能的关键。该合金在 600℃下完全抗氧化，在 650℃下抗氧化。

涡轮壳体加工工艺涉及机械加工，电火花加工、线切割、气胀超塑成形、焊接（点焊、激光焊、电子束焊、氩弧焊等）、焊后热处理等。

针对新型火箭发动机的需要，我国已研制出一种耐低温（-253℃）的 CT-20 钛合金，并制出了 ϕ40 mm，ϕ77 mm 管材，它可用于 50 t 级高压补燃大推力氢氧发动机的氢管路系统。CT-20 合金性能见表 7.5-13。

表 7.5-13 CT-20 低温钛合金性能

温度/℃	σ_b/MPa	δ/%
室温	≥600	≥20
-253	≥1 200	≥10

1.2.2 钛合金在卫星工程中的应用

钛合金在我国卫星工程中的应用已有 30 多年的历史。1970 年 7 月 24 日发射的首颗“东方红”一号卫星的观测裙和播放“东方红”乐曲用的天线就是用钛合金制作的。随着宇航工业的发展，钛在卫星工程中的应用越来越广。目前，钛已成为研制新一代应用卫星必不可少的材料。

钛合金在卫星工程中，主要用于卫星结构和总装系统，控制系统，空间遥感器系统和燃料贮箱等方面。

在卫星星体结构和总装方面，为减轻卫星的结构质量，增加有效载荷，提高功能比，要求结构材料必须具有高的比强度，而钛合金在常用的金属结构材料中，其比强度是最高的，因此在许多卫星结构中选用了钛合金。

1）钛合金波纹壳和远地点发动机支架 新型通信卫星的承力筒锥段由于采用 TB2 高强钛合金制成大口径双波纹壳结构，其质量可减小约 50%，抗载能力提高 80%；采用双波纹板结构制作远地点发动机支架，也显著的减轻了支架的结构质量。

2）钛合金星箭连接包带 星箭连接包带是卫星和火箭的连接装置。当火箭把卫星送到预定轨道时，包带迅速解锁，卫星把火箭抛掉，而卫星本体继续飞行。因此，星箭连接包带对确保卫星的发射成功极其重要。包带的工作温度为 -60~100℃，而且在发射过程还要经受冲击、振动和噪声等考验，必须选用强度高、冷成型性好、耐高低温性能稳定的 TB2 钛合金材料。这种合金是一种 β 型合金，经过地面严格考核试验后，已用于“三三一”工程。采用这种合金包带发射的卫星已有多种气象卫星和通信卫星。

3）钛合金螺栓等紧固件 卫星上使用的螺栓等紧固件，过去一直采用 30CrMnSiA 优质结构钢。为了减小卫星的结构质量和提高功能比，在研制的新型通信卫星上已开始采用钛合金螺栓。目前已研制成功的有 TB2、TB3 钛合金冷镦螺栓，它们比强度高，与同种规格钢质的相比，可减重约一半，在返回式卫星和新型通信卫星上采用高强钛螺栓，均可减重 10 kg。此外，由于钛合金热导率小，只有钢质的 1/3~1/4，所以在卫星仪器舱上采用钛合金螺栓还可起温控作用。例如，由于钛合金螺栓热阻大，将它用于暴露在外面的仪器舱上时，它散热慢，有利于仪器保温，特别是在低温下工作时，它可使系统温度相对提高 30℃，这对仪器正常工作十分有利。

4）钛合金回收舱端框 我国发射的返回式卫星的回收舱端框，是采用精轧钛合金制作的。端框对钛合金材的形状平直度和尺寸公差均有严格要求。

1.2.3 卫星控制系统的应用

卫星控制系统用于宇宙空间中卫星飞行轨道和飞行姿态的控制，“有卫星大脑”之称。在这一系统中，同样也采用了钛合金。

1）钛合金气瓶 钛合金气瓶是贮高压气体的容器，用做卫星中的动力源。由于这类气瓶属高压容器，所以对材料的要求高。钛合金气瓶材料有 TA7，已在卫星中应用较早，已是一种工艺成熟的定型产品。

2）执行机构用钛管 执行机械钛管是给卫星姿态控制发动机输送燃料的管路，要求材料不仅耐燃料介质的腐蚀，而且管材必须无气孔、针孔和夹杂等缺陷，气密性好。特别是对管材的内表面要求更为严格，不允许有裂纹、麻坑等缺陷，表面划痕不得大于 0.03 mm。如果内表面不光滑，只要残留 0.05 mm 大小的灰尘等颗粒，就可能造成管路堵塞而出现事故。

3）钛-钢复合自锁阀 大容量通信卫星控制系统的自锁阀，除要求材料具有良好的抗剪强度、疲劳强度、冲击韧性等力学性能外，还要求焊缝的气密性和耐蚀性好。鉴于此种情况，在设计上选用了钛-不锈钢爆炸复合材，解决了异种金属的连接难题。

4）喷注器用高温钛合金 姿态控制发动机的喷注器是在高温状态下工作，因此材料必须具有较高的高温强度和抗蠕变性能，同时还要求与推进剂燃料有很好的相容性和抗热震能力，热震 80 万次其残余变形应小于 0.2%。为满足上述设计要求，选用了可在 550℃下工作的高温钛合金（Ti53311S 和 7715D 合金）。

1.2.4 在燃料贮箱中的应用

钛合金的卫星共底表面涨力燃料贮箱是为通信卫星远地点发动机和姿态控制发动机存贮与提供燃料的容器。它不仅关系到卫星发射的成败而且与卫星的飞行轨道、姿态控制精度、卫星的工作寿命相关。因此对材料的强度、韧性、可靠性要求十分苛刻，如使用 16 mm 厚的钛板，其单个不连续缺陷直径不得大于 0.5 mm，氢含量不得大于 20×10^{-6}。

1.2.5 空间遥感器（像机）

为减小相机的质量和提高镜头组件的精度，选用线胀系数小的钛合金是非常合适的。资源卫星像机的镜头框架选用（ZTC4）钛合金铸件，而在返回式卫星上，不仅镜头框架而且镜筒和镜座也由钛合金铸造而成。在多次发射飞行中，新相机的拍照实测效果都非常好，例如，拍摄的图像清晰、畸变差小、幅面照度均匀。钛材在空间相机上的应用，为我国空间摄影技术的进步做出了重要贡献。

1.2.6 温控系统用钛合金

卫星上的温控系统作用是使卫星的仪器、设备，在限定的温度下正常运行。该系统的散热片选用 TiNi 形状记忆合金制作。利用 TiNi 合金的双向记忆效应可实现仪器、设备的自动调温。在该系统中，形状记忆合金既是热传感元件，又是驱动元件，使散热片结构简单可靠，也有利于减重。这是新型功能材料在卫星上的成功应用和技术创新。钛在卫星中的应用可产生显著的经济效益。卫星每减重 1 kg，可减少 10 kN 的推力，可节省 20 多万美元的发射费用。通信卫星每

减少 10 kN 有效载荷可创效益 400 万美元。如果新型通信卫星的螺栓、储箱与气瓶全部采用钛合金代替钢制造，则螺栓可减重 10 kg，而储箱和气瓶可减重 15 kg，总共减重 25 kg，可产生 1 亿美元的经济效益。

1.2.7 钛在航天飞机上的应用

航天飞机是在天地之间往返、可以重复使用的载人航天器，在技术和经济上有它的特点。它除了自身获取空间及地球信息外，还可释放卫星。美国已有多艘航天飞机。1981 年 4 月 12 日，世界上首架航天飞机即美国的“哥伦比亚”号航天飞机发射成功。航天飞机具有火箭和飞机两方面的特性，是一个非常庞大、复杂的系统。它由轨道器（航天飞机）、外贮箱（贮存航天飞机入轨前所需推进剂）、固体火箭助推器（两个）等大三部分组成。其中一、三部分要重复使用，设计寿命 100 次。“哥伦比亚”号航天飞机重 68.8 t，总系统高 65.1 m，重 2 020 t。为了使往返于天地之间的有效载重量最大化，高比强、比 Al 合金更耐热的钛成为航天飞机的重要构件。

在航天飞机上使用的钛材部位主要有：高压容器、翼前缘部、油压管路、发动机推力支架等。

1）高压容器　钛合金高压容器用于贮存燃料和高压气体。而燃料和气体是各种推进装置及生命维持系统运转所必须的物料。钛容器在美国的双子星座飞船、阿波罗飞船上都采用过。在阿波罗飞船上为了减重，钛制压力容器的安全系数非常小，仅为 1.5，大大低于以前设计使用的安全系数 4。在航天飞机上所采用的压力容器要承受 $2.1\times10^7\sim3.5\times10^7$ Pa 的高压。其器壁实际上是复合结构，即以钛为衬底，外加芳香族有机纤维强化。纤维给钛衬底施加一个预应力（压缩应力），这样的结构能使压力容器的重量比单层全钛容器轻 35%。容器用材及其焊丝均使用 Ti－6Al－4V 合金。

2）翼　翼的前缘部最高温度可上升到 538℃，铝合金无法承受，F－Ni 基合金太重，因此选用 Ti－6Al－4V 合金。翼通过一套夹具机构固定在翼支承结构上，夹具也使用 Ti－6Al－4V 合金。

3）油压配管　航天飞机上有大量油压管路，采用 Ti－3Al－2.5 合金无缝管做配管，能使管路减重 40%。

4）发动机推力支架　在航天飞机的后部有支持三台主发动机的推力支架，通过它能将 510 t 的推力传递给航天飞机。推力支架采用高强钛合金，原因有三：一是载荷大，支架相当重；二是推力支架作为轨道飞行器的一部分而进入轨道，它对进入轨道和离开轨道时的燃料量有相当的影响；三是航天飞机后部偏重，很需要结构减重。经过强度、刚性、可靠性的比较，专家选择了钛合金。同时在其表面采用硼环氧树脂层进行复合。硼环氧树脂的比弹性模量比 Ti－6Al－4V 合金弹性模量高，但二者热膨胀系数相近。硼环氧树脂复合层能提高推力构件的刚性。钛推力支架的连接采用扩散接合法。在真空、高温、高压下形成的结合界面质量很好，接头强度与基材相当。

5）其他部件　由于钛比强度高，在航天飞机上采用钛材的还有后部升降舵的夹具、外部容器夹具、斜框架/尾部转换装置上部、翼/升降副翼间上部表面的密封翼片等构件。

航天飞机构件使用的钛合金毛坯总重量达 54.4 t，经过机加工后，作为轨道飞行器部件，在天上飞行的部件重量达 4.1 t，相当于钛材坯料重量的 7.5%，航天飞机总重（68.8 t）的约 6%。

2 常规兵器用钛

钛具有密度低、比强度高、耐蚀性好、抗弹性能好等优良特性，在常规兵器上有重要的应用。

常规兵器轻量化是武器发展的重要方向。武器质量减小，一是便于士兵携带、使用武器，有利于士兵行军、打仗，特别是在山地、丛林中作战时，武器轻量化有利于提高部队的战斗力。二是便于增加重型装备的空运机动性。坦克、装甲车、榴弹炮类的大型与重型武器，常常要通过大型运输机长途空运或利用直升飞机短途空运，因此减重也是十分必要的。

钛由于耐蚀，在环境较恶劣的条件下（如海边和潮湿地区），能长期不锈蚀，有利于武器的储存，有利于减少维修保养费用。

钛在武器上的应用，常常涉及三方面的问题。

1）钛材料的力学性能及兵器所要求的特殊性能（如抗弹性能）要符合设计要求。

2）钛材料的应用工艺（如焊接、成型）问题能获得解决。

3）钛材料的成本能为军方承受，或产品的性价比能优于钢或铝。钛在常规兵器中的应用可分为在重武器（坦克、装甲车、榴弹炮等）应用和在轻武器（迫击炮、机枪、手枪、防弹衣等）应用。

2.1 钛在重武器中的应用

2.1.1 钛在坦克、装甲车上的应用

随着反坦克技术特别是破甲技术的提高，坦克面临的破甲威协日益增加。坦克为增加战场生存能力，其防护层的层数、厚度和质量不断增加，导致坦克的质量也不断增加。表 7.5-14 列出了美国 M1 主战坦克质量增加的趋势。近 10 年来，地面装甲车辆的质量增加了 15%～20%。

表 7.5-14 美国 M1 型系列坦克的重量

年份	坦克型号	质量/t
1980	M1	54.4
1984	M1IP	55.3
1988	M1AJ1	58.9
1990	M1A1	62.1

坦克质量的增加，不利于坦克空运和行驶。在用 C－17 大型运输机空运艾布拉姆斯（Abrams）主战坦克时，美国军方希望一架运输机能运 2 辆坦克。为此，坦克必须减重。另外，战区的桥梁承载能力也往往有限，不允许太重的坦克通过。因此坦克也必须减重。用钛代替轧制均质装甲钢是战车减重的有效途径。

实验表明，Ti－6Al－4V 钛合金具有良好的防弹性能，是一种良好的装甲材料。在防弹性能相同的情况下，虽然钛装甲的厚度要比钢装甲增厚 25%，但钛装甲的质量要比钢装甲轻 25%。

钛在坦克和装甲车的许多部位都可以应用。已应用的部位有：装甲车、装甲指挥车的指挥炮塔；坦克顶装甲、坦克履带板、销钉、中心导块、链条、主动轴、悬挂臂、托杆、扭力轴、前轮辐等。

用 Ti－6Al－4V－2Sn－0.5Fe－0.5Cu 合金锻制的坦克履带和负重轮用于 50 t 坦克上，通过了 3000 km 的野外跑车试验，证明是可行的。美国水城兵工厂用 Ti－6Al－4V 制成的 XM－21 型装甲车的两个指挥塔，重 177 kg，比钢炮塔减重 37%。装甲用 Ti－6Al－4V 合金板的厚度为 16 mm～120 mm 不等。每台 M113 型装甲运兵车的钛装甲板用量约 1.8 t。这种坦克的市场潜力约 4 000 台，需用约 7 000 t 钛材。M113 侧面的附加装甲用 32 mm 厚的钛板制造，重达 1 026 kg，前斜装甲采用 50.8 mm 厚的钛板，重达 751 kg。这些部位采用钛合金附甲装甲板可以防大口径炮弹的攻击。

在 M1A2 型坦克上的用钛部件及减重效果见表 7.5-15。由该表可见，在 M1 坦克上用钛代钢，可使坦克减重 475 kg。

表 7.5-15　M1A2 上优先考虑用钛部件

替代部件	装甲钢件质量/kg	钛件质量/kg	减重/kg
回转炮塔板	311	228	83
炮手主瞄准具罩	227	160	67
防核战、生化战剂护盖	168	131	37
发动机顶盖	498	358	140
炮塔枢轴架	160	90	70
指挥舱盖	80	56	24
车长热成像观测仪盖	146	92	54
总　计	1 591	1 116	475

另外，美国还将 M1 坦克的护板、轴架、弹药库门、装弹机舱盖、炮塔展开板、筑路桥臂、炮塔弹药门、顶板等 30 余个部件改用钛部件。如果这些全部采用钛件，可使坦克减重 1 0t 以上。

指挥舱盖用厚度为 100 ~ 127 mm 的 Ti - 6Al - 4V 合金厚板加工而成的，每个舱盖重 68 kg。美国从 1997 年开始指挥舱盖改装，第一批改装了 580 辆，总计要改装 1 000 辆。M1 坦克的顶部攻击装甲用 80 mm 厚钛板制造，能减小质量 35%。

限制钛在战车应用的主要因素是钛产品成本较高。为制造低成本的钛装甲，国外想了许多办法。一是开发低成本的军用钛合金，如 Timet62S 钛合金。该合金中的添加剂以 Fe - Mo 中间合金（炼钢用的原料）形式加入，代替较贵的 Al - Mo、Al - V 中间合金，有利于降低成本；二是革新钛装甲板的制造工艺。例如，采用电子束冷床炉熔炼技术熔炼钛合金扁锭，直接轧制成板材。同传统的真空电弧炉熔炼圆锭相比，缩短了工艺流程，提高了成材率。同时，因电子束冷床炉熔炼可彻底消除各种夹杂，允许大量使用钛残料做原料，也有利于降低钛装甲成本。

2.1.2　钛在榴弹炮上的应用

20 世纪 80 年代中开始，美国陆军致力于开发一种轻型榴弹炮，该炮要能用 UH 直升机或其他小型飞机整体吊运，在战场上迅速部署。1987 年，英国 VSEL 公司设计出一种 155 mm 榴弹炮，其火力与传统榴弹炮相当，但质量仅 3.7 t，大约是传统大炮质量之半，其中钢件约重 2 t，用钛零件 1 t 多。该榴弹炮已在 1990 年完成射击考核试验。

2.1.3　钛在反坦克导弹上的应用

国产某型反坦克导弹的弹体和发射架系统中，选用 TC9 钛合金中做舱机与架体。通过多次靶试，表明它满足技术要求，已通过技术鉴定。

2.1.4　钛在干扰弹发射器上的应用

我国某部的一种可移动的多管式发射系统，采用高强而耐蚀的钛合金管材、板材做炮身和座板，经使用证明，满足设计要求。

2.1.5　钛在弹体和弹药上的应用

1）高能炸药　金属钛在高温时具有极活泼的化学活性，燃烧时可放出大量的热，特别是当钛和碳化合而生成碳化钛时，所产生的热量相当于 TNT 炸药的 6 倍。利用此特性，美国陆军部门研制出新型高能炸药。在破甲弹的炸药上涂上 1 层 1 mm 左右厚的钛，在爆炸时，它与气体如 CO、CO_2、NO_2 等发生猛烈的作用，可有效地增强炸弹的杀伤力。

2）精确制导　在导弹和制导炮弹中，在弹尾翼上安装 TiNi 形状记忆合金装置，可提供一种机电操作伺服控制的活动式尾翼，尾翼的迎角通过内部电流的大小来改变，从而使弹体的飞行得到精确的制导与控制。美国海军研制的这种活动尾翼控制装置采用标准的 55 - Nitionl 形状记忆合金，其成份为 Ni55%，Ti 45%（质量分数），密度为 6.18 g/cm^3，熔点 1 310℃，抗拉强度 875 MPa，弹性模量 84 GPa。

用记忆合金制成的活动式尾翼，控制系统比其他机械性控制装置简单，不占用弹体内部空间，可使导弹或制导炮弹装填更多的炸药，或使弹体减重，增加射程，这种记忆合金尾翼控制系统还可用于鱼雷、潜艇等水下武器装备。

2.2　钛在轻武器上的应用

2.2.1　钛在高射机枪上的应用

钛用作高射机枪的制退器，可减小机枪的质量和后座力。用熔模石墨精铸工艺制造的 ZTC4 钛合金铸件已用于"85 式"高射机枪，经 7 000 发枪弹的寿命试验，证明使用效果良好，满足设计要求。以精铸的 ZTC4 制退器代替 TC4 棒材加工的制退器件，可使材料利用率由 18% 提高到 94%，节省了大量机加工费用。该项成果已于 1991 年进行了鉴定。

喷火器是近距作战的轻武器，它用来消灭隐藏在丛林、杂草、洞穴中的敌人。喷火器由于持枪体和背负的油瓶（高压燃料罐）组成。

我国已研制出全钛的轻型喷火器，所用材料包括工业纯钛，Ti - 3Al - 2. 5V 和 Ti - 451 合金等。这种喷火器的射程达 70 m 多，比钢制喷火器轻 3 kg，而且不生锈，耐低温，适于潮湿、高寒地区环境中保存和使用。轻型喷火器便于战士行军、打杖，特别适于山地、丛林作战，受到部队的欢迎，已批量生产，正式装备部队。

2.2.2　钛在迫击炮上的应用

我国在 20 世纪 70 年代开展了钛制空降迫击炮的研制。100 mm 迫击炮的座板是采用 TA7 合金整体冲压而成。钛合金底板比钢底板轻 10 kg。随后，我国又研制成功 82 mm 全钛空降迫击炮。该炮的炮身、底座和支架全部采用钛及其合金制作，同 82 mm 钢制迫击炮相比，钛迫击炮减重 16.6 kg。

2.2.3　钛在防弹衣上的应用

防弹衣是士兵、武警、公安、海关、商界、政界部门人员用以保护自身安全、更好地执行任务的重要防护装备，防护材料有纤维织物型的软材料（如凯夫拉）和金属、陶瓷型的硬材料及复合材料。软材料质轻、穿着舒适，但价格昂贵，容易失效，子弹攻击后凹坑较深，易使着装者内脏受伤，高强钢质硬材料抗弹性能好，但面密度大，特别笨重，还需要防锈涂层。因此比软质材料廉价、比钢轻巧的钛合金防弹材料获得了应用。试验表明，用做防弹衣的薄装甲材料，应采用强度较低而塑韧性较好的钛合金。厚度大于 2.6 mm的退火钛合金板可抵"五四式"手枪弹的攻击。

3　舰船及海洋工程用钛

钛比强度高，耐蚀性强，在海水、海洋大气及潮汐环境中均有极好的耐蚀性，从技术性能上来看，它远优于钢、不锈钢、铜、铝等各种常用金属结构材料，是海洋工程中最理想的材料。钛在海洋工程中的应用，对人类近期与远期的发展都有重要意义。在海洋工程中，舰船占有重要地位，潜艇和核潜艇具有特别重要的战略地位。因此，从军事意义来讲，钛在舰船上应用的重要性仅次于航空。

（1）海洋开发的重要性

海洋占地球表面积的 71%，是资源的宝库，是人类拓展生存空间的重要场所。当今世界面临着人口剧增、资源枯竭、能源危机、环境恶化等基本问题。人类社会的持续发展将越来越强烈地依赖于海洋开发。

海洋中的主要矿产是锰结核和热液矿。锰结核分布在

4 000～5 000 m深的大洋底，含镍、铜、锰、钴等76种元素，总量达3万亿吨，而且还以1 000万吨/年级的速度在增长，可供人类消费几万年到几十万年。海底蕴藏着约70亿吨黄金，133亿吨白银。海洋中还蕴藏着巨大的动能和核能。海水中的核聚变燃料氘、氚的储量巨大。据测算，200年内，地球上的石油、煤、天然气资源均面临枯竭的危险，石油只能采40多年，天然气只能采50多年。然而，每1 L海水中含30 mg氘，通过热核反应可产生的能量相当于300 L汽油，就是说，'1 L海水约等于300 L汽油'。海洋中还有40亿吨铀资源。海洋核能可供人类用数百亿年，可谓"取之不尽，用之不竭"。大力开发海洋是人类的必然选择。海洋在21世纪及未来必将成为激烈的国际竞争场所。

我国有18 000 km大陆海岸线，6 500多个海岛和300万平方公里的专属管辖海域。沿海有4亿人口和占全国65%以上的工农业生产。近海有丰富的生物、天然气、矿产、海洋能和旅游资源，开发海洋关系到国家经济、社会的发展，关系到国家主权和权益，是21世纪我国面临的重大课题。

随着我国国力的增强，远洋开发也日益提上议事日程。

海洋开发涉及海上交通、海洋探测、海洋环境监测、深海油气开采、深海采矿、海洋农牧化、海洋能源利用、海水淡化及其综合利用、海上建筑（人工岛、机场、跨海大桥）等。轻质高强耐蚀的钛材在海洋开发中将大显身手。用Ti－6Al－4V合金制做的深潜器下潜深度已达10 000 m，成为人类征服海洋的开路先锋。

（2）钛在海洋工程中的适用性

海水中含有Na^+、K^+、Mg^{2+}和Cl^-等10多种离子，有很强的腐蚀性。在海洋中使用的材料，一般要能承受海洋大气、海水、潮汐（大气与海水交替作用）和海生物的腐蚀，还要承受海水冲刷与海浪周期性冲击，因此材料应有良好耐蚀性和较好的综合力学性能。另外，如果装备要浮在水中，低密度和高强度也是很重要的。实验表明，钢、不锈钢、铜、铝材料在海洋环境中都属于不耐蚀的材料，使用时必须采用涂层或其他的保护措施，唯有钛是非常耐蚀而不虽涂层保护的结构材料。钛也是有利于获得最大浮力结构的材料。每一米水深，海水静压力增加10.1 kPa。为了使壳体在给定的水深有足够的强度，必须增加壳体壁厚。

虽然钛在热力学上是不稳定的金属，其标准电位为－1.63V（SHE），但由于氧化膜的钝化作用，使其腐蚀电位大幅度正移。钛在25℃天然海水中的自腐电位约0.1 V（SCE）左右。钛的钝化膜具有非常好的自愈合性。当钝化膜被破坏之后，能迅速地修复，弥合成新的保护膜。因此，钛能在含氧的溶液及含氯离子的溶液中保持钝态。

在海洋环境中，钛既耐均匀腐蚀，也抗局部腐蚀。实验室和工程实践表明，无论在静止海水还是高速流动海水，也无论是清洁海水还是污染海水，甚至含有大量泥砂的海水中，钛均能保持钝化状态，表现出极优异的耐蚀性。

在低速（1m/s）海水中，钛的腐蚀率仅为7.6×10^{-7} mm/a。在高速海水（20 m/s）中，钛的腐蚀也可以忽略不计。在被污染（含硫化物）的静止海水中，按估算，钛1 000年的腐蚀量也不足0.03 mm，即也可忽略不计。虽然海生物易在钛表面生长附着，它也不影响钛的耐蚀性。在中性海水中直到130℃，钛都保持良好耐蚀性。只有在更高的温度或较低的PH值条件下，钛才有可能发生点蚀或其他局部腐蚀。

我国将钛（TA2、TA5、Ti－75、TC4）在青岛、厦门等海域进行的长期腐蚀试验表明，钛在海水中有良好耐蚀性：

1）在7.45 m/s海水流速以下，TA5合金没有实质意义的腐蚀损耗。

2）在10 m/s的流动海水中，TA2、TA5、Ti－75等合金的腐蚀行为都很轻微，没有明显的腐蚀痕迹，腐蚀率均为0.000 3 mm/a左右。

3）在36 m/s的流动海水中，所有材料的腐蚀率都很低（≤0.001 mm/a）。

这些数据表明，在现代海洋工程技术所面临的各种海水流速下，钛均可适用。

表7.5-16、表7.5-17、表7.5-18比较了钛与其他金属在海水中的腐蚀性。

表7.5-16 温度对钛在模拟海水（盐水）中均匀腐蚀的影响（30 d试验；腐蚀率：mm/a）

钛材牌号	70℃	150℃	250℃
Ti－50A	0.000 06	0.002 6	0.014
Ti－Code12	0.000 07	0.000 09	0.003 2
TA9（Ti－0.2Pd）	0. 000 09	0.000 03	0.002 4

可以看出，在较高温度下，TA9（Ti－0.2Pd）合金的耐蚀性最好。在各种海洋环境下，钛的耐蚀性都远远优于钢、铜合金等传统材料。

表7.5-17 钛和其他金属在不同水质条件下的相对耐蚀性

材料	海水质量	均匀腐蚀	点腐蚀		应力腐蚀破裂	液滴冲击腐蚀
			流动	静止		
Ti	清洁	1	1	1	1	2
	污染	1	2	2	1	
铝黄铜	清洁	2	1	3	1	2
	污染	2	4	4	4	
90－10 CuNi	清洁	2	1	2	1	3
	污染	2	4	4	4	
70－30 CuNi	清洁	1	1	2	1	2
	污染	2	4	4	4	

注：清洁—COR（化学氧）$<4\times10^{-6}$；$O_2>4\times10^{-6}$；$NH^3<1\times10^{-6}$；$S^{2-}<0.020\times10^{-6}$。

污染—COR $>4\times10^{-6}$；$O_2<4\times10^{-6}$；$NH^3>1\times10^{-6}$；$S^{2-}>0.020\times10^{-6}$。

1—极好；2—好；3—一般；4—劣。

表7.5-18 钛和其他金属在静止海水中的抗缝隙性能比较

	完全耐蚀材料	Ti，合氏合金C
耐缝隙腐蚀材料	好	90－10CuNi1.5Fe，70－30CuNi0.5Fe，黄铜，青铜
	较好	铸铁，碳钢
	较差	Incoloy 825，Ni－Cu合金，纯铜
缝隙引起深度孔蚀材料	AISI316，304，400型不锈钢 Ni－Cr合金	

钛在流动海水中的耐蚀性和电偶腐蚀作用。

许多实用海洋工程不是全钛结构。而是多种材料并存的复合结构，存在电偶腐蚀问题。

在静止海水中，TA5钛合金对钢、合金钢与铜合金的电偶腐蚀试验表明：

1）在608铸钢和B30铜镍与钛偶合时，电偶腐蚀作用随面积比增大而增大，面积比为1/20时，电偶腐蚀因子都在9以上，但两者也有差异。608铸钢是因全面腐蚀增加而使电偶腐蚀增大，而B30铜合金是因点腐蚀增加而增大。B30的

腐蚀比608铸钢的电偶腐蚀要低1~2个数量级。

2) TUP紫铜和ZHSi80-3黄铜受钛的电偶腐蚀作用较小，在面积比小于1/20时，紫铜仅为0.84，硅黄铜电偶腐蚀因子最大也仅为1.32。TA5面积增大时，还会促进TUP紫铜的钝化，降低其电偶腐蚀作用。

3) 在1/1面积比下，TA5钛合金仅对608铸钢有明显的电偶腐蚀作用，而对紫铜、硅黄铜、高锰铝青铜、B30铜镍合金都没有明显的电偶腐蚀作用，对后两种合金的电偶腐蚀因子甚至为负值。

4) TA5与高铬钢（05Cr25Ni17MoCuN）的电偶腐蚀作用非常小（10^{-4} mm/a数量级），可以忽略不计。

以上结果表明，在工程应用中，钛产生的电偶腐蚀与接触金属的种类和面积比等因素有关。应区别对待。应尽量控制钛与其他金属材料的面积比。一般来说，当钛与其他金属材料的面积比大于4:1时，对其他金属材料来说将是危险的。而当钛与其他金属的面积比等于或小于1时，电偶腐蚀作用可明显减轻，甚至是可以接受的。铸钢、碳钢受钛的电偶腐蚀作用较显著，在面积比达20:1时，腐蚀率可增加9倍，在静止海水中，腐蚀率可达1 mm/a以上，在流动海水中可达每年数毫米之多。

(3) 中国船用钛合金的发展

到目前为止，世界上只有俄罗斯、美国和中国进行专门的船用钛合金研究，形成了自己的船用钛合金系列。我国的船用钛合金主要是按屈服强度等级划分。分为低强合金（在490 MPa以下）、中强合金（在490~790 MPa）和高强合金（790 MPa以上）三个档次。低强钛合金塑性好，主要适用做管材；中强钛合金，强、塑、韧性兼顾，制造工艺性好，适用制做大厚截面构件，在大的拘束下焊接时，宜采用这类合金。高强钛合金的塑性低，冷成形性、可焊性也不好，主要用于船舶工程中的耐热、耐蚀部件和船舶特种机械。我国船用的钛合金系列及其特性见表7.5-19。2003年，中国已制出了T-4Al-0.005 B钛合金 ϕ1 820 mm×1 420 mm×267 mm的大型环件，其组织、性能均满足船舶制造的设计要求。

表7.5-19 中国的船用钛合金系列及特性

类别	合金牌号	屈服强度/MPa	性能特性与应用
低强合金	TA2	320	成形性好、焊接性能好、耐海水腐蚀；冷压成形件、管件、海水淡化、各类换热器、船舶部件等
	Ti31	490	成形性及可焊性好，耐180℃高温海水腐蚀；回路管系、热交换器
	ZTA5	490	铸造性能好；船舶推进系统、电子系统、辅助系统中的泵、阀及其他铸件
中强合金	TA5A	590	耐蚀可焊性好；其板材、锻件可用于船舶机械各类部件
	ZTi60	590	铸造性能好、耐蚀、可焊；可用于推进系统的铸件生产及进排气系统铸件
	Ti70	590	冷成形性、可焊性、耐蚀性能好；主要用于船舶导流罩及其他冷成形件
	Ti91	590	中等强度、良好的塑性、透声性能、耐腐蚀性能和可焊性，适合于进行冷成形加工
	Ti75	630	耐蚀、可焊、断裂韧度高；其板材锻件可用于船舶结构、推进系统结构件、压力容器、水中兵器系统的发动机轴件
	Ti80	785	耐蚀、可焊；可用于高压容器、深潜器的耐压壳体、船舶焊接结构件
高强合金	ZTC4	690	铸造性能好；螺旋桨等高强铸件
	TC4	825	船舶部件，蒸汽透平机叶片，水中兵器系统发动机外壳、蓄压器等
	TC11	900	燃气轮机高压压气机转子、低压压气机轮盘及叶片
	TiB19	1 150	高强度，韧性较好，可焊；用于船舶机械部件、高压容器

3.1 钛在舰船中的应用

舰船包括水面舰艇和水下舰艇，水面舰艇有巡洋舰、驱逐舰、航母、破冰船、水翼艇、商船、渔船、油船等，水下舰艇有常规潜水艇、核潜艇、深潜器等。舰船是一个特别复杂的工程结构。除壳体、动力装置外，它还有各式装备、仪器及辅助系统。制造这些装置需要各种类型的材料，以满足舰船技术战术性能、可靠性、耐久性等方面的要求。

在舰船用钛方面，俄罗斯在核潜艇与破冰船上是最先进的，而美国、日本在深潜器方面是最先进的。

3.1.1 钛在核潜艇中的应用

潜艇及核潜艇的重要特征是下潜深度大，水下隐蔽性好，巨大的船体不能在焊后进行热处理，在风浪及高速行驶时要承受巨大的静载荷和动载荷，除强度外，要求材料的塑韧性和抗疲劳性都非常好。钛合金比强度高，极耐海水长期腐蚀，又有适当的成形性、可焊性、加工性能，适于做潜艇壳体材料。

此外，钛无磁性，不易受磁性水雷攻击，敌方反潜装置难以发现；钛合金的透声系数高，适于做声纳导流罩。船体头部用钛代替钢、玻璃钢做声纳导流罩，可提高潜艇的侦察能力，增加可靠性和减少维修成本。

在20世纪60年代至80年代，前苏联生产了一系列钛制攻击型潜艇。包括钛合金用量达3 000 t的“阿尔法”（α）级核潜艇和用钛量达9 000 t的“台风”级核潜艇。第一艘“台风”级导弹核潜艇1984年建成，其水下排水量为2.65万t，比美国1981年服役的“俄亥俄”级导弹核潜艇几乎大1倍，水下航速约27节，比后者的水下航速快30%。“台风”级潜艇可携带20枚战略导弹，威振五洲，成为超级大国的重要象征。前苏联共造了六艘“台风”级潜艇，第六艘“台风”潜艇下水时间是1989年，是苏联瓦解的前夕。俄罗斯继承了前苏联的核潜艇技术，从90年代中期开始，建造“北风之神”级第四代潜艇，这种新的战略核动力潜艇的第一艘称为“尤里·多尔戈鲁基”号，预计2003年投入使用。目前，俄罗斯正在建造多用途核潜艇。新潜艇采用钛合金双层壳体结构，潜艇的安全可靠性及战术性能有进一步改善。

俄潜艇用的钛合金主要是TA17（ПТ-3B即Ti-4Al-2V）和TA16（ПТ-7M即Ti-2Al-2.5Zr）。它们的成份和性能见表7.5-20。TA17强度较高，主要用做板材、棒材和锻件，用于潜艇壳体，也用做声纳导流罩骨架、热交换器管板。TA16强度较低，但塑性更高，只用做管材，制造管路与热交换器。

表7.5-20 俄罗斯两种船用钛合金的成分与性能

合金牌号	成分/%			性能（退火）	
	Al	V	Zr	σ_b/MPa	δ/%
TA17（ПТ-3B）	3.5~5.0	1.2~2.5	0.30	<880	10
TA16（ПТ-7M）	1.8~2.5	—	2.0~3.0	470~666	20

声纳导流罩（透声窗）是船体的一部分，位于船体鼻艏处。电磁能在水中传播损失大，不能远距探测。声能在水中传播的损耗远比电磁能小，因此，水下传递信息使用声能，可进行较远较灵敏的探测，声纳是船的水下最有效的观察设备。声纳导流罩是装在声纳基阵外面的巨形流线型罩子，是水下声学信息进出的通道。声纳导流罩材料在满足结构强度、耐蚀性、成形性等方面要求的前提下，应有良好透声性能。钛合金同钢、橡胶、不锈钢等导流罩材料相比，综合性能最优。我国已初步开发出一种 Ti－Al－Zr－Fe 系的导流罩用钛合金 Ti－70。它的基本性能参数是：$\sigma_b \geqslant 700$ MPa，$\sigma_{0.2} \geqslant 600$ MPa，$\delta_5 \geqslant 20\%$；耐海水腐蚀，在60℃海水中，均匀腐蚀率≤0.001 mm/a；焊接接头性能为：$\sigma_b \geqslant 630$ MPa，$D = 7a$，冷弯角180°；与船体钢电偶效果1.43。

3.1.2 钛在深潜器中的应用

深潜器是一种可以潜入几百米至上万米深度，完成特定工作的装置，可广泛用于海洋探测、深海打捞、救生、军事行动等方面。当下潜深度达到6 500 m时，它可以直接探测世界98%的海域。

耐蚀而高强的钛合金，非常适于制造深潜器的耐压壳体及其他部件。我国为发展深潜器技术，专门研制了强度为785MPa级的Ti80合金。性能见表7.5-21。美国、日本、法国都建造了各种钛制深潜器。

表7.5-21 Ti80合金与Ti－6Al－4V ELI合金的性能比较（板厚30～48 mm）

合金	σ_b ($\sigma_{0.2}$)，/MPa	δ5 (ψ)，/%	a_{KV}/kJ·m^{-2}	KIC (K_{ISCC})/MPa·m$^{1/2}$	低周疲劳/周	
					ε_t = －1.75%	ε_t = －1.2%
Ti80	785～885 (880～925)	12～16 (34～50)	770～816	117 (84)	1 034	5 075
Ti－6Al－4VELI	870～892 (947～950)	15～16 (33～41)	294～392	88.4 (55.8)	1 000	5 000

1974年，美国用船用钛合金 Ti－6Al－2Nb－1Ta－0.8Mo 合金代替 HY－100 钢建造了“阿尔文”（AlVin）号深潜器耐压壳体（尺寸为7.72 m×3.04 m×2.4 m），并用 Ti－6Al－4V 合金制成深潜器的浮力球和高压气瓶，使深潜器的下潜深度由1 830 m增加到3 600 m。Ti－6Al－2Nb－1Ta－0.8Mo合金的特点是应力腐蚀敏感性较小。深潜器使用的钛合金板厚达49 mm。

此后，美国海军又用 Ti－6Al－2Nb－1Ta－0.8Mo 合金做耐压壳体，将2 000 m级潜水器“海崖”号改造成6 000 m级的深潜器。此外，美国在救援深潜器上也大量使用了钛合金部件，如骨架、浮力球、绞盘罩和紧固件等。

日本科学技术厅以海洋调查和科学考察为目的，在1978～1981年间建造了“深海2000”深海潜水调查船。该调查船可乘3名船员，下潜2 000 m，一次调查时间以8 h为标准。它装备有4个 Ti－6Al－4V ELI 合金椭球状压力容器，半球部使用厚36 mm的钛板制造，圆筒部分用厚100 mm的钛板制成，材料要求符合 AMS 4907C 标准，要求容器的耐压强度达5 450 MPa压力。实际安装部件都进行潜航深度1.1倍的外压试验，以确保安全。

“深海2000”深海潜水调查船上还配有能紧凑地安装耐压舱、耐压容器、装备仪器、浮力器材、外壳等部件的“外壳骨架”。骨架主要使用纯钛挤压型材（ASTMB 348Cr3），接合部使用纯钛热轧板材（JISTP49）。

在90年代，日本又建造了“深海6000”号调查船。该船下潜深度更深，船体积更大，Ti－6Al－4V 合金壳体的尺寸达9.5 m×2.7 m×3.2 m，下潜深度可达6 500 m，日本近海所有大陆架都可以探测到。

法国先后建造过6 000 m级的“SM97”号潜水调查船和半球形海底实验室（直径2.1 m），其壳体都用 Ti－6Al－4V 制造。

单人盔甲式常压潜水器是海洋深水作业的先进装备，对深海工程、海洋军事都有很高的价值，我国已在80年代研制成 KZF－1 型钛制盔甲式常压潜水器，这种潜水器操作灵活、配有有线、水声、VHF应急电台装置，安全可靠。广州救劳局的潜水员利用它曾下潜到121 m深海底进行作业。这种潜水器在空气中重（无操作者）308 kg，在水中重20～25 kg（有操作者），比国际著名的 Sam 型铝制常压潜水器轻10%以上。国产 KZF－1 钛制潜水器价值为45万人民币（约合5.4万美元）。在海洋工程、打捞等作业中，国产钛制潜水器的效益非常好。

3.1.3 钛在舰船动力装置中的应用

动力装置是舰船的心脏。动力系统中包含许多热交换器、海水淡化器、冷却器、冷凝器。采用不锈钢等材料制造动力系统，会给动力系统，特别是核动力系统带来许多麻烦。由于腐蚀泄漏，系统密封性遭受破坏，常发生各种严重的事故。俄罗斯专家经过多年研究认为，在舰船动力系统中的热交换系统，没有什么其他材料的性能可与钛合金相提并论。

俄罗斯在核潜艇和原子能破冰船的动力装置中广泛使用钛制蒸气发生器。在俄罗斯的“列宁号”、“北极号”、“俄罗斯号”和“苏联号”上都使用了钛制蒸气发生器。俄罗斯核动力装置的蒸汽发生器的寿命是“永久”型的，即与破冰船是同寿命的，可长达数十年。

俄罗斯的一体化压水堆蒸气发生器使用TA17和TA16钛合金作管板和传热管。这种先进的核动力堆，具有高效、紧凑、安全的特点，是核潜艇、破冰船、航母等使用的关键装备。

自1962年以来，俄罗斯投入运行的钛合金热交换设备有近万台，详见表7.5-22。说明这是一项很成熟、有效的先进技术。

表7.5-22 俄罗斯从1962年以来投入运行的钛合金动力设备

设备名称	设备型号数量/个	设备总台数/个	已服役年限/年
船用热交换器	18	6 300	25～35
核动力装置蒸汽发生器	6	2 900	20～35
核动力装置热交换器	12	60	5～25

钛用于动力装置这种长效设备，有特别明显的技术经济效益。表7.5-23给出了在蒸汽发生器中使用TA16钛合金与不锈钢的对比。由表7.5-23可见，钛材虽然价贵，钛制蒸汽发生器的原始价格是不锈钢价格的5倍，但由于它的使用寿命比后者高一个数量级，因而在整个服役期内，钛制蒸汽发生器的平均价格仅为不锈钢蒸汽发生器价格的40%～30%。

表7.5-23 TA16钛合金与不锈钢在蒸汽发生器中使用的效益对比数据

对比项目	不锈钢	钛合金 (ΠT－7M)
设备材料费和制造费相对价格	1	5
蒸汽发生器寿命，千小时	12	120
在船服役期内更换设备的次数	9	0
蒸汽发生器的相对运行价格（包括更换设备费）	2.5～3.4	1

舰艇螺旋桨、螺旋桨轴是受海水冲刷腐蚀和空泡腐蚀最严重的部件，一般铜合金及铸钢材料的使用寿命只有1~2年。改用钛合金，可大大延长部件的使用寿命，美国已在多种舰艇上使用钛合金螺旋桨。如海军用水翼艇“普兰维尤”号使用了直径达1.52 m、四叶片钛合金螺旋桨，材料为Ti-6Al-4V合金，桨重337 kg。美国还在“阿希维尔”号高速炮艇上使用了四叶片、高螺距钛合金螺旋桨，在SES-100B试验艇上使用了六叶片超空泡可调螺距钛合金螺旋桨。

我国于1972年研制成功TC4和TA17钛合金水翼艇螺旋桨。

钛合金也是舰船喷水推进装置的优质材料。美国SES-100A试验艇使用工业纯钛铸件与TC4合金锻件做喷水推进器。日本鱼雷艇“PT-10”号的喷水推进器原用铝青铜制造，改用ZTC4合金后，在安全转速（1 560 r/min）不变的情况下，轴径由95 mm减少至75 mm，质量减少600 kg。这是由于钛合金的强度与耐蚀性优于铜合金之故。美国在扫雷艇上也使用了钛合金推进轴和螺旋桨，钛的导电率比铜小，以钛代铜制造推进器的另一个好处是克服了铜合金部件在航行时切割地球磁力线而产生的感应电流较大，不利于扫除磁性水雷的问题。

3.1.4 钛在舰船辅助装置的应用

钛具有优良的抗均匀腐蚀、点蚀、应力腐蚀、生物腐蚀和抗冲刷腐蚀能力，并具有高的比强度，在通海系统和海洋环境中，钛特别适于做管道泵、阀及其他配件等舰船辅助装置。用它取代钢、不锈钢、铜等材料，可取得不错的技术经济效益。

船舶制造业对船用管路系统有这样的要求：其结构材料应该保证在第一次进船坞修理前有8~9年的使用寿命，系统完全更换前的使用寿命不应小于15年。这可使所有级别的船有效运行25~30年。在船体25年服役期内有10万小时的工作状况。钢、铜合金、不锈钢管道系统经过2~3年使用后，就会腐蚀破坏，只有钛合金能满足这样的要求。经验表明，由于耐蚀性强和疲劳强度高，钛合金管道、阀门、泵及配件等产品的寿命不小于12万小时，服役期限不少于40年，中间不需要更新维修，大大降低了系统与整个船体的故障率。同时，由于耐蚀性好和强度高，钛部件可以减少管道壁厚的腐蚀设计余量，还可以在水流量不变的情况下通过增大水流速来缩小管道直径，使船用设备小型化和轻量化。

3.1.5 钛在民用船舶中的应用

钛具有耐腐蚀、高比强等重要特性，有利于实现船体的轻量化。船体结构使用钛材，不但可以减小船体自身质量。增加有效质量或提高船速，而且可以减少维护费用，延长舰船的使用寿命。一般船用钢、铝合金、不锈钢等，难于承受海水腐蚀。它们作为船壳体，除施加保护涂料外，还需要经常维护，不到10年就要大修，而钛几乎不需要维护修理，寿命可以达数十年。

日本开发出了一种全钛渔船。该船长12.5 m，宽2.8 m，总重4.6 t，其船壳体、甲板及许多机件均用钛制造，船壳钛板厚度仅2.5 mm，如果用铝合金制船壳，则需5 mm厚。与目前常用的纤维增强塑料和铝合金船体相比，钛渔船船体轻便，耐蚀，易回收废弃船体，不需要表面涂层，环境污染少，易于清理表面附着的海生物，大大减少了维护费用。该项技术可以用于制造钛娱乐船、快艇和高速巡逻艇等。

3.2 钛在海洋工程中的应用

世界石油资源的极限储量是10 000亿吨，可采量约3 000亿吨，其中海底储量约1 300亿吨。因此，研制海上采油设备非常重要。

海上采油设备主要包括采油平台和附属设备，附属采油设备有原油提升管、冷却器、泵、阀、接头和夹具等。由于是深海采油，这些设备尺寸都很大。提升管长达几百米，质量也很大。采油设备的工作环境是相当恶劣的。一是要与海水和原油接触，要经受氯化物、硫化物、氨等多种介质的腐蚀；还有海上生物污染引起的腐蚀。二是要承受系统内部的工作载荷和海上风浪产生的冲击载荷，对材料的强度、韧性、抗疲劳性能有很高的要求。

钢、铜合金在海上采油系统工作介质中易受到严重腐蚀，而钛在海水及原油中的耐蚀性极好，因而是更为合适的采油设备材料。英国的北海油田、俄罗斯的波罗的海油田都成功地采用了钛制采油设备，效果都非常好。

目前用钛制造的海上采油设备有：石油平台支柱、列管式与板式换热器、提升管应力接头；管道、泵、阀、紧固件及勘探测井仪器外壳保护管等。

钛合金用于海上采油系统是因为具有高比强、良好韧性、低的弹性模量和高的弯曲疲劳寿命，能耐高达300℃的含盐与酸性油井流体腐蚀和300℃以下海水腐蚀等特性。

1）海上钻井立管　立管它不仅要强度高、质量小，而且要有高的损伤容限，易于用传统技术进行检查。英国北海油田首次采用钛合金立管。它采用韧性高的Grade29、Grade23钛合金。这种高压立管由30根ϕ599 mm（内径）×25mm（壁厚）×14.6 m（长）的Grade23钛合金管连接而成。这种钛合金立管的优点是：① 它质量较小，可将立管的牵引力从9.8 MN降至3.7 MN，从而减少了紧张轮的尺寸；② 可减少立管底部的活动连接，从而使其在钻井平台结构中易于手工操作；③ 减少了平台系统承载负荷；④ 耐蚀性好，不需要表面涂层；⑤ 经济性好。尽管钛合金立管的成本较不锈钢等材料的要高，但使用后其整个系统的成本比原来降低了40%。

2）钻管　钻管对屈服强度和疲劳强度有很高的要求，采用Grade5（Ti-6Al-4V）合金。在短距钻井中（曲率半径在18 m以内），传统的不锈钢钻管很容易出现转动疲劳和物理磨损。用Cr-Mo钢接头将TC4（Ti-6Al-4V）钻管连接起来，可避免工具卡死和磨损，保证其韧性和高的疲劳寿命。

1999年，美国用外径为73 mm的钛合金管钻成了10口曲率半径为18 m的油井。后来又用外径为63.5 mm的钛合金钻管钻成了曲率半径为12~15 m的油井。在长距离钻井中，用钛合金管代替钢管做钻管，可增加钻进极限深度，即由6.1 km增加到9.1 km，钻具的起吊力大约可减少30%，扭矩可减少30%~40%，从而可克服液压传动装置的限制。另外，钛合金管无磁性，它不干扰油井探测仪的探测。

3）锥形应力接头　钛制锥形应力接头的长度只有钢制接头的1/3，二者成本相近。金属锥形应力接头比橡胶/铜等柔性接头好，具有结构紧凑，易于检查，气密性好的优点，并可在高温下使用。钛制应力接头在墨西哥湾和北海油田的钻井平台上都获得应用。

在英国北海油田，用钛合金代替合金钢（Cr-Mo钢）做高压油管，由于装备减重和减少了维护费用，使采油装置的成本下降了40%。该油田使用的高压油管是组合结构，单根钛管尺寸为ϕ609 mm×25 mm×1 460 mm，重3 t，30根钛管组装在一起，组成了400多米长、总重900 t的特大油管系统，用于水深350 m的海底采油。由美国著名的RMI公司提供的这种大型钛油管，自1995年以来，已在北海56个油井中采用，效果很好。

用于海上采油系统的钛合金有Ti-6Al-4V、Ti-6Al-4V ELI、Ti-6Al-4V-Ru等。Ti-6Al-4V-Ru是Ti-6Al-4V的改进型合金，微量Ru用于改善Ti-6Al-4V合金的抗缝隙腐蚀性能。Ti-6Al-4V-Ru的屈服强度与Ti-6Al-4V ELI相同，均为759 MPa。

4）钛制海水冷却器及凝汽器　滨海地区的石化企业发电厂、炼油化工厂的冷却器和凝汽器，常采用海水冷却。由于海水，特别是污染海水对铜合金管的腐蚀严重，使冷却设备经常发生泄漏，而不能正常运行，使生产者处于防不胜防的被动局面。采取注入硫酸亚铁、涂膜、电化学保护等防蚀措施也不太有效，而且带来环保问题。

钛的价格为铝黄铜价的8～10倍，但钛的密度仅铜合金的一半，并且由于耐蚀，钛管子壁厚要比铜管壁厚薄许多，即由1.6 mm降到1 mm。这样一来，单位长度的钛管材价格就降至铜合金管材价格的2.5～3.2倍。如果钛管壁厚度降为0.5 mm，则二者的比价仅为1.25～1.6倍。钛设备的使用寿命为30年以上，而铜合金设备的使用寿命仅2年。如果加上铜合金设备因故障造成非计划停车对生产的影响与维修费用，使用钛制冷却器与冷凝器的技术经济性就非常显著。据某化工厂5台海水冷却器的统计，在10年时间内，铝黄铜冷却器的更新费用达120多万元，不同规格5台铜合金冷却的总造价为101万元，而钛设备总造价为247万元。经过10年运行后，二者设备投资相当，但钛设备还光亮如新，可继续安全使用。随着使用时间的延长，钛设备的效益日益增大。

5）钛在海水淡化装置中的应用　经济的发展与城市化进程的加快，淡水用量剧增，淡水短缺现象日益严重。我国现有600多座城市，其中300座缺水，130座严重缺水，海水淡化已成为沿海地区解决用水问题的必然选择。

海水淡化装置的选材非常重要。表7.5-24和表7.5-25比较了几种材料在海水中的耐蚀性，可清楚地看出，钛是最佳的海水淡化装置传热管材料。

表7.5-24　海水淡化装置换热器用各种材料耐蚀性比较

管材	工段		耐蚀性			
			均匀	局部	管外	污染海水
铝黄铜	海水加热器		A	A	A	B
	热回收	高温	A	A	A	B
		低温	A	A	A	B
	散　热		A	A	A	B
焊接钛管	海水加热器		A	B	A	A
	热回收	高温	A	B	A	A
		低温	A	B	A	A
	散　热		A	B	A	A
铝合金（3003）	海水加热器		A	B	B	B
	热回收	高温	A	B	B	B
		低温	A	B	B	B
	散　热		A	B	B	B
低合金钢（2Cr、3Cr钢）	海水加热器		C	B	C	B
	热回收	高温	C	B	C	B
		低温	B	B	B	B
	散　热		B	B	B	B
不锈钢（25Cr钢）	海水加热器		A	B	A	A
	热回收	高温	A	B	A	A
		低温	A	B	A	A
	散　热		A	B	A	A

注：A—优；B—良；C—尚可。

表7.5-25　各种传热管材在海水中使用1万小时后的破坏比例

破坏原因＼材质	90～10 CuNi	70～30 CuNi	铝黄铜	铝青铜	Ti	合计
均匀腐蚀	4.6	1.7	1.7	16.0	0.0	23.0
溃　蚀	5.9	1.5	7.4	16.0	0.0	30.8
点　蚀	10.5	1.3	2.3	32.0	0.0	46.1
振动破坏	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
合　计	21.0	3.5	11.4	64.0	0.1	100

表7.5-26比较了在海水淡化装置中，钛与其他材料的实际使用效果。可以看出，用钛做淡化海水装置的传热管是最安全可靠的。

表7.5-26　蒸发法海水淡化装置各种传热管破坏更换率　　%

管材材质	部　位		
	散热工段	热回收工段	盐水加热器
铝黄铜	7.94	1.66	18.60
90－10CuNi	2.95	0.40	3.41
70－30CuNi	2.36	0.00	11.28
70－30CuNi＋Fe＋Mn	0.03	0.02	1.33
Ti	0.00	0.00	0.00

海水淡化有闪蒸法、电渗析法及反渗透法等多种工艺方法，其中蒸发法应用最普遍，蒸发法淡水占世界人造淡水的绝大部分。在海水淡化装置中，海水加热器要承受90～120℃的海水腐蚀，特别是热回收部分高温段导管中的海水大部分为蒸汽，腐蚀性非常强。在放热区，温度为常温至40℃，未经处理的原海水会流入导管，海水中经常混入藻类、贝壳、砂石等。采用B10和B30铜管，很快就会出现腐蚀现象。在闪蒸发淡化系统中，大量使用薄壁焊接钛管，典型尺寸为ϕ34.7 mm×0.5 mm、ϕ25.4 mm×0.5 mm，其中钛管大部分安装在热回收部位（占80%以上），其他安装在放热部位（10%）、盐水加热器（3%～4%）等部位。在沙特阿拉伯的一座淡水厂有40台产能23 600 t/d的海水淡化装置，其放热蒸发器共用了约1 500 t纯钛焊接管，而热回收部分主要采用90/10CuNi管，盐水加热器部分使用70/30CuNi管。

在多级闪蒸型海水淡化热交换器上使用钛管时，要注意预防缝隙腐蚀、接触腐蚀和吸氢。为防止钛的缝隙腐蚀，必须使管与管板接合处不形成间隙。在形成钛/铜合金接触电偶的地方，在高温部位（80℃～100℃）要控制防蚀电位范围，以维持在－0.5～0.65 V（SCE）为宜，电位过高，会产生铜合金的腐蚀；电位过低，会造成钛吸氢。

海水淡化业发达国家是中东地区（沙特阿拉伯、伊朗、巴林等）、美国、德国、日本、意大利等国。2000年，美国已使海水淡化能力达日产70万吨，并在南太平洋海岸利用核电站的蒸汽建造大型海水淡化工厂。到2000年，全世界已建海水淡化装置300多座，日产淡水量近1000万吨。钛在海水淡化中的应用技术日益成熟。

6）MSF型海水淡化厂用钛　薄壁钛管用于海水淡化厂在经济上可与铜、镍合金竞争。实践中发现，将薄壁钛管固定在铜合金管板上有一定难度。日本的试验表明，以辊式扩管法可以方便地将薄壁钛管固定在铜合金管板上。试验钛薄

壁管为 ϕ34.7 mm×0.5 mm、ϕ25.4 mm×0.5 mm、ϕ34.7 mm×0.7 mm，管板为 Cu-Ni（70-30）、Cu-Ni（90/10）、铝青铜，三种扩管长度为42、52、62 mm。拉伸试验表明，开坡口与不开坡口对拉伸应力没多大影响；拉伸应力与管规格和扩管减薄率有一定关系：ϕ34.7 mm×0.5 mm 管，减薄率超过6%时，对拉伸应力无明显影响。拉伸应力与 t/D 因子（t：管壁厚，D：管外径）几乎成正比，为获得足够的拉伸应力，应控制 t/D 设计参数，即使减薄率达30%，在扩管部分也不会产生裂纹和破损，能承受3小时0.8 MPa的水压浸渍试验而无泄漏。因此，钛管与铜合金管板的连接是可靠的。

据统计，到1992年，全世界有5 700多个地区建立了9 000套海水淡化设施。总容量达 $1\ 624\times10^4 m^3/d$，其中中东地区达 $891\times10^4 m^3/d$，占全世界总量的55%；其次是美国，为 $237\times10^4 m^3/d$，占15%。海水淡化的方法分别为蒸发法占60%，逆浸透法占33%，电透析法占5.5%。

7）钛在其他海洋工程中的应用

① 钛管用做船用雷达鞭状天线。

② 鱼雷发射用水缸，用TA7钛合金锻件制造，我国已用于实践多年。

③ 美国用βc高强钛合金制造航母飞机弹射装置用的高压制动水缸。

④ 钛用于捕鱼设备，包括潜水捕鱼泵、鱼片精加工机、鱼粉加工机螺旋推进器、海水淡化器、管道等。俄罗斯极地海洋渔业及海洋地理学研究所将钛制潜水捕鱼泵用于中型拖网渔船上，其潜水捕鱼作业深度可达20 m。

⑤ 钛用于海水养殖。例如，用钛板式养殖框养殖石斑鱼（中国福建）；用钛金属网和钛管热交换器（维持一定水温）养殖狮鱼、比目鱼、鳗鱼等（日本），促进渔业由捕捞业向养殖业转变。

海水鱼业养殖网通常是用人造纤维或电镀钢丝制做的。然而，化纤网易黏附海藻和水生贝类，使鱼场环境变坏。清除栏外海生物的生长，每三个月必须进行一次。镀锌钢丝耐蚀性差，仅能使用两年。锌和铁离子还会造成海水污染。另外，处理废弃的化纤和镀锌网钢丝的费用很高。

相比而言，新开发的钛丝养殖网，耐海水腐蚀力强，使用寿命在10年以上。钛网不易受海藻和水生贝类破坏。在网上也无需涂防护剂。另外，钛网轻而且可重复使用。钛网的主要缺点是价格较贵，通过开发钛企业与鱼业厂家的合作，钛网成本下降。这项新技术正在日本推广应用。

⑥ 污染海水处理：用镀铂钛阳极电解海水，制取次氯酸钠，杀灭大肠菌。

⑦ 海上设施：海上航标架、海中游泳区安全游标、海底电缆等。

⑧ 海上建筑：跨海大桥的桥墩保护套

4　核电及火力发电用钛

4.1　钛在汽轮机中的应用

火力发电和核能发电的大型汽轮发电机组的功率可达100～6 000 kW。火电汽轮机的典型工况为：转速2 600 r/min，蒸气进口温度约为540℃（1 000°F），压力（表压）为16.5～24.1 MPa（2 400～3 500 lbf/in^2）。核电汽轮机的工况为：转速1 800 r/min，蒸汽进口温度约为500°F，压力（表压）为6.2 MPa（900 lbf/in^2）。核电与火电相比，汽轮机的转速较低，但供气量大，汽轮机的体积要大些。日本川崎重工开发的200 kW，1 500 kW和6 000 kW级燃汽轮机都使用了钛材。

1 500 kW级MIA-13燃气轮机的一级涡轮用TC4（Ti-6Al-4V）锻件（最大直径450 mm），二级涡轮盘用高温钛合金TA19（Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo）锻件。该机的额定转速为22 000 r/min。

6 000 kW级M7A-01燃气轮机的转速为1 400 r/min，其轴流压缩机前半段低温部分的动叶片用Ti-6Al-4V合金锻件。

发电汽轮机通常由连接在一根轴上的几个独立的汽缸组成。从蒸气发生器出来的蒸气首先进入高压汽缸，然后进入中压气缸和低压气缸，使转子获得能量。钛材常用于蒸气温度低、蒸汽量大和叶片最长的低压气轮机上，与传统叶片材料相比，有许多优点：

1）增大汽轮机的尺寸和功率容量　钛密度低，用钛代钢做叶片，高速转动产生的离心应力小，可降低叶片本身及转动轴的应力。在不增加叶片或转轴应力的情况下，叶片长度可增加40%。有利于大幅度提高汽轮机的功率容量。

2）提高汽轮机的效率　在蒸汽流量和功率不变的条件下，较长的叶片可以增加排出流通截面，降低排出速度，并降低排出能，从而增加输出功率，提高热效率。研究表明，末级叶片长度增加10%～40%，火力发电汽轮机的热效率可提高1%以上，核电汽轮机的效率则可提高2%以上，这将产生相当巨大的经济效益。例如，热效率提高1%会使一台500 MW的燃油发电设备，每年节约100万美元以上。

3）提高叶片的耐蚀性和发电设备的安全可靠性　叶片因腐蚀而失效是造成电站汽轮机被迫停机的主要原因。据统计，叶片损坏事故中有1/3与腐蚀有关。在发电设备上，多种原因（水处理不合格、冷凝器泄漏、脱盐器故障等），会使氯化物和其他一些化学腐蚀物进入蒸汽循环系统，引起汽轮机合金钢叶片的均匀腐蚀、应力腐蚀和腐蚀疲劳。虽然开始时腐蚀物质的浓度很低（十亿分之几），但在汽轮机的局部区域内，通过常年累月的沉积，腐蚀物质的浓度会明显增加，造成严重的局部腐蚀。

在低压汽轮机的过渡级（水分开始形成蒸汽，膨胀后通过汽轮机的区域）上，蒸汽中的氯化物最容易在此沉淀，氯化物的浓度可高达28%，促使合金钢叶片严重腐蚀。

钛在氯化物介质中几乎不受点蚀和应力腐蚀破坏，因此它是末级叶片的最佳候选材料。

美国、俄罗斯、日本、英国、瑞士等国的汽轮机公司，都对钛合金叶片做过深入的研究。美国的通用电器公司、西屋电器联合公司、日本三菱重工业公司等都有成功应用钛叶的经验。TC4（Ti-6Al-4V）钛合金是大多数厂家选用的叶片材料。

在低压汽轮机长叶片的工作温度下（约225°F），TC4（Ti-6Al-4V）钛合金的屈服强度比叶片用403型不锈钢的强度高50%。因此，TC4（Ti-6Al-4V）钛合金在设计中有充裕的静态强度余量，有利于叶片承受旋转力和蒸汽扭矩弯曲力所产生的固定载荷。在关键的疲劳强度上，TC4钛合金在空气中的疲劳强度（R=-1）也比403型不锈钢高10%～20%，有利于叶片承受振动载荷。在低压叶片最坏的工况条件（176°F，22%氯化钠浓度，PH值为4，而氧含量小于 20×10^{-9}）下，TC4的疲劳强度只下降了12%，而403型不锈钢的疲劳强度下降了约75%。此外，长期点蚀还可能导致403型不锈钢强度的进一步下降。因此，用钛取代合金钢做末级叶片是很必要的。

应指出的是，钛合金用于汽轮机叶片时要充分考虑振动问题。

当叶片通过非均匀汽流场时，叶片上会产生振动应力。振动应力通常取决于与转速有关的频率。为避免共振引起的高振动应力，设计时必须使叶片的固有频率偏离旋转频率。

叶片的固有频率是由叶片的几何形状以及材料的比弹性模量（E/ρ）决定的。虽然TC4钛合金的弹性模量和密度与

403型不锈钢大不相同，但比弹性模量接近一致。因此，在给定的几何形状结构中，直接用钛代替不锈钢有很大的可能性，即可能保持谐调。当然，这需要通过实际尺寸叶片的试验或模型试验来验证。

钛与常用叶片钢相比，其材料减振程度较低，这也是需要考虑的一种因素。

国外TC4透平叶片已经实用化，为进一步提高透平效率，使其小型化，日本神户制钢正在开发高强β钛合金叶片，如TB6（Ti-10V-2Fe-3Al）和TC17（Ti-17即Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr）合金叶片。叶片加工采用大气中下的3 000 t等温锻造。

我国对汽轮机用钛叶片已进行过一些初步的研究。自行研制成大型汽轮机末级钛合金长叶片，该叶片材料为TC4钛合金，榫头和叶身为一体锻成，长710 mm，重9.2 kg，比常规的2Cr13合金钢叶片（18 kg）约轻一半，钛叶片采用630 kN·m对击锤精密锻造工艺而成。

钛叶片锻造的难点在于：钛合金的锻造的变形抗力为钢的3~5倍，可锻温度范围窄，仅约100℃，而且钛合金粘性大，成形性较差。同时，榫头和叶片横截面上的厚度差很大，最大差15倍。锻造过程中各部分的温降难以均匀控制，易导致局部锻裂和变形。大型钛叶片精锻的关键是要解决叶片错位、低温锻裂、弹性回跳、冷却和热处理引起的叶片扭曲和型面变形等问题。精锻叶片只要少量打磨、抛光等后续加工便可装机使用。TC4叶片的抗水蒸气腐蚀和高速水滴腐蚀性能远高于合金钢叶片。该叶片拟用于20×10^4 kW汽轮机。

4.2 钛在沿海发电站凝汽器中的应用

沿海发电站凝汽器是重要大型设备，冷却介质是海水。电站凝汽器历来是用钢及铜合金制造，但它们抗海水腐蚀性差，使用寿命短。腐蚀常造成凝汽器泄露，迫使电站停机，造成重大经济损失。在海水，特别是污染海水的作用下，常用的铜合金凝冷器易发生点蚀、孔蚀、应力腐蚀和疲劳腐蚀现象，导致设备泄漏，迫使电站停机。我国某大型电厂在1992~1997年五年间，就因为铜管凝汽器频繁泄漏而多次停电，电站累计停机4 000多小时，少发电2.2亿度，损失1 300多万元，另外，由于更换铜管200多吨，损失200多万元，总共损失1 500多万元，即因冷凝器材料不耐蚀造成的泄漏损失每年达300多万元。表7.5-27比较了各种冷凝器管的耐蚀性，它清楚地表明，钛管的抗蚀力最强。

表7.5-27 各种材料凝汽管在海水中的相对耐蚀性

腐蚀原因	海军黄铜	铝黄铜	90-10 CuNi	70-30 CuNi	不锈钢	Ti
均匀腐蚀	2	3	4	4	5	6
磨蚀	2	2	4	5	6	6
点蚀（运转中）	4	4	6	5	6	6
点蚀（停止时）	2	2	5	4	1	6
高流速水	3	3	4	5	6	6
入口磨蚀	2	2	3	4	6	6
蒸汽腐蚀	2	2	3	4	6	6
Cl^-腐蚀	3	5	6	5	1	6
NH3腐蚀	2	2	4	5	6	6
应力腐蚀	1	1	6	5	1	6

国内外的实践证明，大型电站的冷凝器和热交换器采用钛材是最合适的，国际上自20世纪60年代开始研究钛制电站凝汽器，70年代实现了钛凝汽器的工业应用。全世界电站装机总容量约2×10^7 MW，火电站和水电站约5 000多座，采用钛凝汽器的约占3%~4%，核电站380多座，采用钛凝汽器的约占30%，美国、日本、法国的电站等都大量使钛凝汽器。1977~1999年，日本共新建26座核电站，都采用钛冷凝器，合计使用4 783 t薄壁焊接钛管。据估计，全世界电站用用的钛焊管已达26 300 t以上。

我国于1978年开始研究沿海电站凝汽器用钛，1983年实现全钛凝汽器的工业应用。台州电厂的125 MW发电机组在我国首次采用国产的全钛凝汽器，换热面积6 800 m²，后来又有几台全钛凝汽器投入运行。我国的镇海发电厂、秦山核电站（一期30×10^4 kW、二期$2\times60\times10^4$ kW）、广东大亚湾电站（$2\times90\times10^4$ kW）等均采用了全钛凝汽器。经过多年实践，全钛凝汽器在我国已成为一种成熟的工业技术。

到1999年，我国共有27家电厂、96台机组使用钛制凝汽器。装机容量为2.95×10^7 kW，累计用钛管3 100 t，平均每年用300 t。其中90%从国外进口，从日本进口1 490 t，英国670 t，法国370 t，英国270 t，国产仅310 t。据估计，在“十五”期间，滨海电站用钛管量将达到每年800 t。

沿海电站采用钛凝器的优越性很多：

① 可就地利用海水资源，不需要淡水做冷却介质；

② 省去除盐及阴极保护装置；

③ 延长凝汽器寿命。钛凝汽器的寿命比铜合金凝汽器的寿命提高4~6倍，经济效益非常好；

④ 增大电站安全工作系数，减少停电检修时间；

⑤ 减少冷凝管的壁厚，强化工艺参数，提高凝汽器的换热效率。

我国电站用钛情况见表7.5-28和表7.5-29。电站主要使用薄壁焊接钛管。大亚湾核电站所用钛管最长达16.6 m，每台冷凝器用钛管量达4万多根。我国已具备自行设计制造电站大型钛设备的能力。

表7.5-28 我国电站用冷凝器用钛情况

发电厂	单机容量/MW	全钛冷凝器/台	部分用钛的冷凝器/台	用钛量/t	
				管	板
上海金山热电厂	50		4	16.8	
台州发电厂	125	5		90	35
			1	18	
镇海发电厂	125	2		36	14
			1	5	
	200	2		60	20
全钢发电厂	350	2		80	36
黄岛发电厂	200	1		30	10
沙角发电厂	200	2		60	20
石洞口发电厂	300	1		40	15
秦山核电厂（一期）	300	1		90	24

冷凝器钛焊管的标准中国有GB 3625—1995TA2，日本为JISH4631—1994（一级）和JISH4631—1994（二级），美国为ASTM B338—1994（一级）和ASTM B338—1994（二级）。ASTM B338要求$\sigma_b\geqslant270\sim450$ MPa，$\delta_5\geqslant20\%$，并满足压扁、展平、扩口等工艺性检测要求。我国由于不能生产钛带，焊接管生产受到制约。

表 7.5-29 核电站用钛设备情况

电站	钛设备	使用钛材	每台用钛量
秦山核电站（一期）	冷凝器（2台）14 00 m^2	TA_2 管 ϕ25 mm×0.7 mm TA2 管 ϕ25 mm×1.0 mm 管板厚 42 mm	17 000 根 200 根
	换交换器（3台）900 m^2	TA_2 管 ϕ19 mm×0.5 mm ×5 840 mm 管板 ϕ1 760 mm×70 mm	21 820 根 2 块
大亚湾电站	冷凝器（6台）	TA_2 ϕ25 mm×0.7 mm ×16 600 mm	41 000 根
	换交换器（8台）900 m^2		

在电站中使用钛材的设备还有二回路空气冷却器中的钛-铝复合翅片。通常所使用的铜-铝复合翅片管的内侧铜管耐海水腐蚀性能差，易发生鼓泡开裂等现象，影响传热效率，威胁电机的安全运行。我国某单位（上海异形钢管厂和上海有色金属研究所等）研制的钛-铝复合翅片管，其热效率优于铜-铝复合翅管，预期使用寿命要比铜-铝复合翅片管提高6~10倍。这种异形复合管还可推广用于用海水做冷却介质的空气冷却器，包括沿海电站、化工厂、舰船工程等。

钛在海水特别是污染海水中具有良好的耐蚀性，耐海水高速冲刷腐蚀性能尤为突出，是制造电站凝汽器较理想的材料。

冷凝器钛管必须具有高的表面质量，防止带放射性的半衰期长的钴60铁锈沉积。为此，薄壁钛管必须经过严格的超声探伤和涡流探伤检验，达到 ASTM B338 标准。

4.3 钛在超导电机中的应用

超导发电机是在发电机转子的激磁线圈中使用超导体的新型发电机，它的优点是发电机的效率可提高0.5%~1%，并具有发电机体积小，重量轻，节省材料和资金，减少占地面积，便于运输等诸多优点。据分析，经济上适用的超导电机的容量应达到 10×10^4 kV·A 以上，这种新型发电机处于研发阶段。

超导电机的电枢线圈是常导铜线圈，转子由超导线圈、保持低温的转矩管和电磁阻尼器组成。转子内部装有液氦，它能将超导磁场线圈冷却到极低温（~4.2 K）。当频率为 60 Hz时，发电机转子的转速应为 3 600 r/min（双极）或 1 800 r/min（四极）。

超导电机转子的结构材料应具有无磁性、高强度、耐低温的特性。钛不仅具有这些特性，而且密度小，高速转动时离心力低，导热率和线膨胀系数小，同不锈钢、镍合金（IN750、706、718）、铝合金（6061-T6）等相比，低间隙元素的钛合金（TA7 ELI 或 TC4 ELI）具有最好的综合适用性。钛是非常理想的超导转子结构材料。

TA7ELI 是最著名的低温钛合金，它是单相 α 合金，在 -240℃超低温下仍有优异的韧性，其缺口抗拉强度/抗拉强度之比在1.0以上，抗拉强度约为常温的2倍，是最为合适的电极转子材料。

TC4ELI 的强度比 TA7 高，但其合金中存在部分的 β 相，对低温性能有不良影响，它的低温韧性略小于 TA7。

日本三菱电机和富士电机公司曾研制过 30 MV·A 的超导电机钛转子，转子直径为 730 mm，总重达 40 t。

4.4 钛在热核聚变装置中的应用

发展核聚变技术，开发聚变能是世界最重大的能源课题。由多国参与（包括中国）的国际热核聚变实验堆（ITER）项目已开始启动。

ITER 的环形磁场线圈（TF 线圈）总体是由俄罗斯设计制造，其超导线圈是日本原子能研究所设计与研制的。试验用的超导线圈的结构是：将 1 152 根（直径 0.01 mm）Nb_3Sn 超导线的绞合线，封入纯钛管中（壁厚 2 mm，内径 43 mm），绕成共9圈（高 600 mm）的线圈。原型线圈在 13T 高磁场中可通过 46 kA 电流，满足 ITER 环形磁场线圈的设计要求。线圈示意图见图 7.5-12。

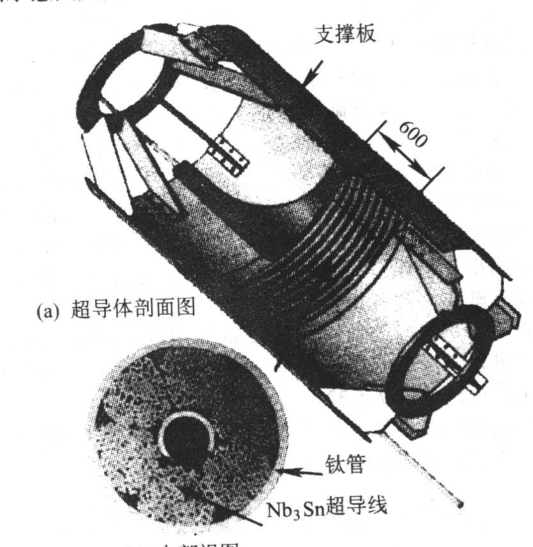


图 7.5-12 超导试验线圈图示

超导线圈中的封管采用钛材而不用不锈钢管的主要原因是线膨胀问题。不锈钢管与 Nb_3Sn 超导线的热收缩（温度变化为 650~-269℃）差异大，会产生大的热应力，使超导体性能（临界电流密度）急剧下降。为此需要选择与 Nb_3Sn 超导线热收缩率相同或相近材料做封管。钛和因科镍 908 合金是合适的材料，但钛无磁性，耐蚀性和加工性优于因科镍合金。因此用钛做封管更合适。试验表明，当采用纯钛封管，磁场为 12 T时，其临界电流是采用不锈钢管的2倍。该成果用于 ITER 导体时，其临界电流提高了30%，在同样的成本下获得了较高的运行性能。

其实，对封管的要求是多方面的。首先，它要具有足够的强度，能承受 ITER 环形磁场线圈产生的强大电磁力。另外，为获得高的临界电流密度，Nb_3Sn 超导体材料要进行 650℃×240 h 以上的长时间热处理。因此金属封管必须耐这种热处理。封管的热收缩量也必须与 Nb_3Sn 线圈材料相匹配。封管还要耐低温。日本专家还研究了时效热处理后纯钛中的氧含量对它在液氦温度（4 K）下力学性能的影响。结果表明，氧含量在约 0.1%时，纯钛在热处理后（650℃，240 h）也能保持其必要的强度和韧性。据此结果，超导线圈的封管选用氧含量为 0.106%的纯钛管。

该项技术可望推广到需要高磁场、大电流线圈的电力贮能超导线圈等领域应用。

5 化工用钛

5.1 化工用钛概况

1954年，美国开始在造纸工业中用钛，处理纸浆。开创

了化工用钛及民用钛的历史。1956年，日本开始使用钛制热交换器，开拓了钛材的一个重要应用领域。日本是钛民用开发最成功的国家，90%的钛材用于以化工设备为主的民用工业。目前，全世界年产钛材约6万吨，其中50%用于以化工为主的民用部门。而且钛应用发展的总趋势是航空应用的比例逐渐下降，化工等民用部门的应用比例不断扩大，因此，钛在化工中的应用对化工部门和钛工业部门来说都是非常重要的。

我国重视钛的民用始于20世纪70年代初。1972年，我国钛工业发生了历史性转变。当时，全国年产钛材约315 t，军工用钛243.6 t，民用仅72 t。钛市场疲软，钛工业面临困境。于是冶金部门决定从民用找出路。拟将钛应用由“军工为主”变为“军民结合”。上海天原化工厂氯碱生产中使用钛阳极电解槽和钛制湿氯冷却器，获得成功，起到了很好的带头、示范作用。1975年，开始真空制盐用钛。1976年，我国确定在年产24万吨尿素的大型化工设备上用钛。1977年，国家决定在40万吨烧碱改造工程上用钛。1974～1979年，召开过4次较大型的全国性钛材应用推广经验交流会。1975年原冶金部召开过‘钛材10年规划会议’。1982年成立“全国钛应用推广领导小组”。1983年4月，在北京召开“全国钛应用推广会议”。这一系列的活动，促进了我国钛的民用，钛逐渐应用到各个部门。

目前，我国各类钛制化工设备的用钛比例见表7.5-30。我国引进化工设备的用钛比例见表7.5-31。国产各类钛化工设备用钛比例见表7.5-32。

由表7.5-32可见，化工设备中，钛制换热器用量最大，已超过化工设备用量的50%。

表7.5-30 国内化工各部门用钛比例

部　门	用钛比例/%
氯碱（包括氯酸钾）	25
化纤、化肥	18
无机合成、塑料	20
基本有机合成	15
染料、中间体	4
精细化工	3
其他	15

表7.5-31 我国引进化工设备用钛量比例

部　门	用钛比例/%
氯碱	25
纯碱、化肥	16
复合肥	16
合成纤维、塑料	22
有机合成	15
染料、中间体	4
精细化工	3

表7.5-32 国产各类钛化工设备用钛比例

部　门	用钛比例/%
换热器	57
电解槽	20
容器（除换热器外）	16
其他	7

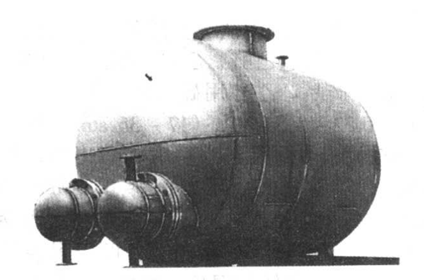
随着科技与工业的发展，化工系统包括了17个行业，即石油化工、氯碱、纯碱、化肥、无机盐、日用化工、医药、农药、染料、化工新材料、涂料、化工新材料、信息化学品、新领域精细化工、化学试剂、化学矿山、化工装备制造等。

化工压力容器一般有4种分类方法：按容器允许工作压力、器壁工作温度、使用情况及容器管理级别分，详见表7.5-33。

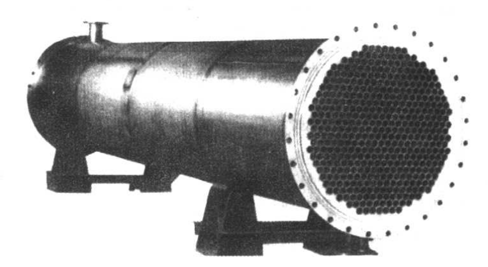
表7.5-33 压力容器的分类

分类方法	容器类型（及代号）	技术特征或典型产品
按工作压力	低压容器（L） 中压容器（M） 高压容器（H） 超高压容器（U）	$0.1\text{MPa} \leqslant p < 1.6\text{ MPa}$ $1.6\text{ MPa} \leqslant p < 10\text{ MPa}$ $10\text{ MPa} \leqslant p < 100\text{ MPa}$ $p < 100\text{ MPa}$
按器壁工作温度分	常温容器 高温容器 低温容器，其中 浅冷容器 深冷容器	$-20℃ < t < 200℃$ $t \geqslant$器壁材料蠕变温度 $t < -20℃$ $t = -20 \sim -40℃$ $t < -40℃$
按使用情况分	反应压力容器（R） 换热压力容器（E） 分离热压力容器（S） 储存压力容器（C，球罐为R）	反应器、反应釜、分解锅、聚合釜等 热交换器、冷却器 分离器、过滤器、缓冲器、吸收塔、干燥塔等 贮槽、槽车、计量槽、高位槽
按管理等级分	一类压力容器 二类压力容器 三类压力容器	非易燃、无毒的低压容器；易燃或有毒的低压分离器和换热容器等 非易燃、无毒的中压容器；易燃或有毒的低压反应器、贮运容器等 高压、超高压容器；剧毒中、低压容器；易燃或有毒的存贮器、反应器等

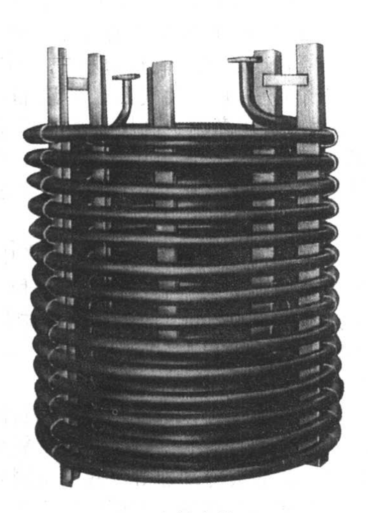
许多钛制化工设备属于中、高压容器或二、三类压力容器，安全生产非常重要。本章主要介绍钛在石油化工、氯碱、纯碱、化肥、医药、农药等化工领域中的应用。典型的钛化工容器见图7.5-13。



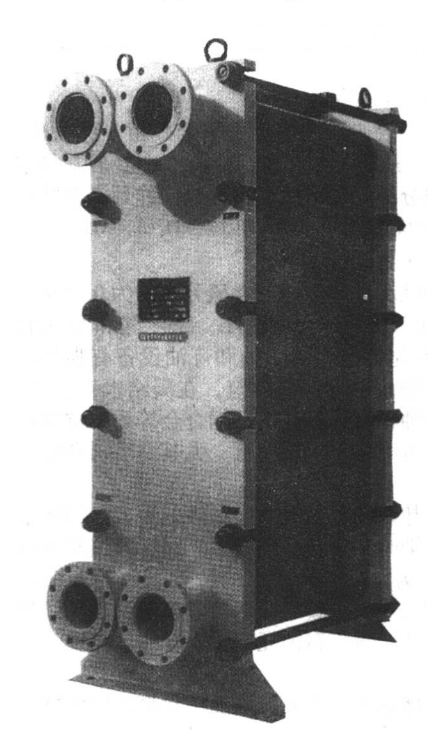
(a) 钛储罐



(b) 管式换热器



(c) 双套钛盘管



(d) 板式换热器

图 7.5-13　典型的钛化工容器

5.2　钛在石化工业中的应用

石油化工是以石油、天然气为原料生产合成薄膜、纤维、橡胶及其衍生物产品的现代工业，在国民经济中占有重要地位。

石油经裂化可以得到甲烷、乙烯、乙炔等多种产品，通过深度加工可以制取醇、醚、醛、酮、羧酸、酸酐、脂、酰胺、脲和胺、腈、氨基酸、高分子化合物等。由此可以制得合成纤维、合成塑料、合成橡胶、农药、化肥等产品。世界大宗化工材料的生产能力和产量见表 7.5-34。我国正在成为世界石化工业大国。

表 7.5-34　世界及中国大宗化工材料的生产能力及产量　　万吨

化工材料品种	世界（1997 年）	
	生产能力	产量
合成树脂	—	13 940
合成纤维	—	2 155
合成橡胶	1 310	1 011
涂　料	—	2 300（1992）
黏合材料	—	>700（1996）

合成树脂以优异的特性而被广泛用于汽车、建筑、机械、电子、信息、包装和日用品等许多领域。许多汽车零件是用合成树脂材料（专用塑料）制成的。每辆汽车用塑料占车重的 10% ~ 20%。农用薄膜也是用合成树脂生产的，我国农用地膜覆盖面积已达 1 亿亩以上。合成纤维占纺织原料的比例达 40% ~ 50%，它的坚牢度相当于天然棉纤维的 3 倍。合成橡胶的应用涉及交通、建筑、机电、日用品、电子信息、航空航天以及生命科学等各个领域。合成橡胶约 50% 用于制造轮胎，每条轮胎的平均用橡胶量 10 kg，大型工程车的用橡胶量达 170 kg。每辆汽车用橡胶配件 500 余种，耗胶量 10 ~ 15 kg。

在石油加工过程中，加工设备要与各种高温、高压、腐蚀性介质接触，易发生腐蚀泄漏事故。石油加工设备常见的腐蚀类型见表 7.5-35。

表 7.5-35　炼化工况环境下各种材料出现的腐蚀类型

材料	出现的腐蚀类型
碳钢、低合金钢	全面腐蚀、氢致开裂、硫化物应力腐蚀
Cr13	点蚀、冲蚀、环烷酸腐蚀

续表 7.5-35

材料	出现的腐蚀类型
18-8、18-12Mo	点蚀、晶间腐蚀\应力腐蚀破裂
双相不锈钢	点蚀、选择性腐蚀
铝黄铜、海军黄铜	冲蚀、脱锌腐蚀
70-30CuNi	硫化腐蚀、脱镍腐蚀
蒙乃尔合金	硫化腐蚀、游离氨腐蚀
Al 合金	全面腐蚀、点蚀
渗 Al 钢	不耐还原性介质

5.2.1　钛在石油炼制中的应用

在原油提炼过程中，脱盐的原油中仍会残留一些盐份。这些盐会水解成 HCl。HCl 蒸汽到达冷凝器中冷凝后，与水形成盐酸。这种酸部分被氨或胺中和，形成同样具有腐蚀性的铵盐或胺盐。因此炼油设备要对 HCl、NH_4Cl、NH_4、H_2S 有良好的耐蚀性，钛正是这种材料。

我国大庆油田和胜利油田的原油含硫分别约为 0.15%和 1%，含盐为 10 mg/L 和 200~400 mg/L。硫化氢和氯化物（氯化镁、氯化钠、氯化钙等）对采油和炼油设备有强烈的腐蚀，特别是当氯化物水解形成氯化氢，在凝结水存在时，腐蚀性更强。由于各种铬钢、不锈钢、铜合金等均不抗这种腐蚀，炼油厂的常压蒸馏装置腐蚀严重，尤其是塔顶和塔顶冷凝器腐蚀更严重。

炼油厂的海水冷却系统也是易发生腐蚀的地方。当海水被硫化氢氨等物质污染时，冷却系统的泵、阀、管道及冷凝器等容易发生腐蚀。例如，输送海水的铸铁泵叶轮寿命仅 60 天，青铜叶轮也仅 0.5 年；碳钢冷却器寿命不到 2 年。根据两个炼油工厂的统计，每年腐蚀耗钢 1.3 万吨，耗资一千多万。

炼油厂的污水处理系统很重要。炼油厂常是环境污染大户。某炼油厂的污水中含油 5 mg/L，硫 0.03 mg/L，酚 0.3 mg/L，COD 达 83 mg/L，钛适于制做污水处理设备。

钛应用于炼油厂，国内外已有许多成功的经验。例如，俄罗斯采用孔隙率 40%~50%的多孔钛板式过滤器过滤原油，日本用钛制做常压蒸馏塔衬里、塔盘及其支承架、换热器、精馏塔以及泵、阀、管道、热电偶套等。美国某炼油厂用钛管取代铜镍合金做换热器，总长达 300 km 以上。我国在炼油厂使用的钛设备有铸钛海水泵、催化裂化气分馏海水冷却器，不凝气深冷分离冷凝器、多孔钛板臭氧扩散板等，都收到了预期的效果。

在炼油设备中，钛主要用做常压原油蒸馏塔冷凝器管组，还可以用做壳式热交换器、管式热交换器、空气冷却器及压力容器等。纯钛用做常压原油蒸馏塔冷凝器时，其使用温度不宜超过 121℃。钛用于石油催化裂化装置、延时焦化装置、酸性溶液汽提塔时，适宜的使用温度为 99~121℃。采用适宜的水质洗涤剂和胺中和剂的条件，Gr.12（相当于 TA10）钛合金用做常压原油蒸馏塔冷凝器的使用温度可达 171℃。Gr.16（Ti-0.004~0.08Pd）合金用于精炼设备时，使用温度可达 177℃。

汽提塔可除去 H_2S 和 NH_3。但汽提塔冷凝物内会有 30%~40%的 NH_4HS，还有一定量的氯化物、氰化物及其他腐蚀性物质。钛是少数几种可有效抗高浓度 NH_4HS 腐蚀的结构材料之一，因此，被用做汽提塔冷凝管件。

5.2.2　钛在石油化工中的应用

钛在石油化工中的应用不胜枚举。这里仅介绍乙醇、乙醛、丙酮、甲酸、乙酸、合成纤维等在五种典型石化产品生产中的钛使用情况。

1）乙醇生产用钛　乙醇是重要有机溶剂和有机合成原料，可用来制造乙醚、乙醛、醋酸、丙酮、乙脂、氯仿等数百种化工产品。乙醇用硫酸法生产，工艺要点是：在 55~85℃、1.72~3.55 MPa（17~35 atm）下将乙烯通过浓硫酸（97.5%）吸收后，经水解塔和蒸出塔，稀释为 38%~42% H_2SO_4，温度 110℃，压力 0.3~0.5 MPa（3~5 kgf/cm²）。在高温稀硫酸的作用下，普通不锈钢泵很快腐蚀报废，哈氏合金泵的寿命也只有一年左右，而用耐蚀钛合金 Ti-32Mo-2Nb 泵，在最高使用温度 130℃的情况下，使用了十多年仍完好。

2）乙醛生产用钛　乙醛大量用于合成醋酸、丁醇、季戎四醇等基础化工产品。乙醛采用乙烯直接氧化法生产，以氯化钯、氯化铜的稀盐酸溶液为催化剂，通过空气或氧气将乙烯直接氧化成乙醛。氧化过程中，反应温度 100~150℃，压力为几个或几十个大气压，溶液 pH 为 1.2~1.5（强酸性），即反应是在高温、高压、强酸环境下进行的，致使生产设备（氧化塔、精馏塔、管道、泵、阀）等均受到严重腐蚀。钛通过介质中存在 Cu^{2+} 和 O_2 的缓蚀作用，具有良好耐蚀性，适于制做乙醛生产设备。

早在 1963 年，美国就在乙醛生产中采用钛设备，包括钛制反应器衬里、换热器、管道、泵和阀等成套设备。钛容器尺寸达 φ3 m×9.6 m，成为当时美国最大的钛装置。钛制乙醛生产成套设备已成为定型设计。一座 6 万吨/年乙醛厂需用钛设备 11 台，总重 20 t。

我国一些溶剂厂、合成制药厂和石油化工厂都成功地使用了与乙醛生产有关的钛设备，包括氧化塔、换热器、催化剂再生器、乙醛液冷却器等。我国从国外引进的乙醛生产装置中均大量使用钛设备。主要材料为工业纯钛，在有缝隙腐蚀比较严重的地方，采用 Ti-0.3Mo-0.8Ni 合金、Ti-Pd 合金或镀 Ti-Pd 合金。

3）丙酮生产用钛　丙酮也是重要的溶剂和有机合成原料，用于合成有机玻璃、环氧树脂、聚碳酸酯、聚异戊二烯橡胶、氯仿、碘仿等产品，是十大化工原料之一。

生产丙酮的方法有很多，如丙烯直接氧化法、异丙醇脱氢法、异丙苯氧化法、乙烃水合法等。丙烯直接氧化法是较经济的生产方法。但氧化反应是在 90~120℃、0.91~1.22 MPa（9~12 atm）条件下进行的，其合成设备和精馏设备、管道等受到沸腾的盐催化剂（$PdCl_2$、$CuCl_2$ 等）的强烈腐蚀，寿命很短。例如，不锈钢阀的寿命仅 2.5 年。

钛材挂片试验表明，在相同条件下，TC4 钛合金的年腐蚀率仅为不锈钢的 1/100（为 0.002 mm/a），用钛可做为丙酮生产中的文氏混合器、氧化加热器、氧化分离器、羰化反应器、闪蒸塔、贫氧空气冷凝器、液位控制器、催化再生器、过滤器、循环泵、阀门等设备。根据定型设计，一座 3 万吨/年产能的大型丙酮生产厂需要约 40 t 钛设备。

4）甲酸与醋酸生产用钛　甲酸（蚁酸）用做媒染剂、防腐剂、橡胶凝聚剂、酸性还原剂，也用来合成脂类产品。它具有强腐蚀性。

甲酸的生产方法有多种，如间接合成法、直接合成法、甲醛氧化法等。无论用哪种方法，甲酸都要经过蒸馏提纯、浓缩工序。各种生产设备均会遇到 100~150℃的甲酸、硫酸、乙酸、丙酸、丁酸等介质的腐蚀。普通不锈钢制的蒸馏塔、分馏再沸器和加热器最长只能使用半年，而工业纯钛和 TA10（Ti-0.3Mo-0.8Ni）钛合金，在通气的浓度为 90%甲酸（沸腾）中的耐蚀性极好，是甲酸生产设备的优质材料。

我国的一些甲酸生产厂已成功地用 TA10（Ti-0.3Mo-0.8Ni）合金做蒸馏塔、分馏塔再沸器、筛板、进料管、出料管、阀门、甲醛氧化反应釜等。在甲醛反应釜内，工作介

质为（0.2%~0.3% H_2SO_4、甲醛、甲酸）的温度达120℃。

醋酸（乙酸）是香料、染料、医药、合成纤维工业的原料，也是重要的溶剂。

生产乙酸的方法有酒精氧化法、乙醛氧化法、低级烷烃氧化法等多种。它们都存在着较严重的腐蚀。

在乙醛氧化法中，以醋酸锰为催化剂，在70~80℃和0.2~0.3 MPa（2~3 atm）压力下，把乙醛氧化成乙酸。在氧化工序，设备要受到80℃醋酸及醋酸锰的强烈腐蚀；在精馏与分馏工序，设备要受到160℃醋酸蒸气的腐蚀和不同浓度甲酸的腐蚀。因此，国内外在精馏塔、分馏塔、蒸发器、高沸物再沸器等装置中采用了钛设备。

在酒精法中，先以酒精氧化制乙醛，再氧化得醋酸。醋酸的强烈腐蚀作用，使不锈钢（SUS316）也难以承受，如蒸发锅盘管加热器，使用寿命仅为2年，而钛盘管加热器可用多年。

上海石油化工总厂是我国化工用钛的大户，其石化用钛具有很好的代表性。上海石油化工总厂的大型化工设备用钛情况见表7.5-36和表7.5-37。

表7.5-36 上海石油化工总厂化工用钛情况

基本有机合成	乙烯氧化制乙醛	反应器、氧化塔、催化剂再生器、除沫器、第一和第二冷凝器、脱高沸物塔、泵等
	丙烯氧化制丙酮	文氏混合器、氧化下加热器、羰化下加热器、氧化分离器、贫氧空气冷凝器、液位控制器、羰化反应器、闪蒸塔、管件等
	乙醛氧化制醋酸	氧化塔、脱沸塔、醋酸回收塔、醋酸冷凝冷却器、高沸物再沸器、泵、阀等
	轻油氧化制醋酸	冷凝器、加热器、分离塔、氧化塔、阀门等
	甲醇低压羰基化制醋酸	闪蒸器、精馏塔等
	对苯二甲酸生产	氧化反应器
	氯乙醇法生产环氧乙烷	次氯酸化塔、碱洗塔
	丙烯生产	塔盘、再沸器等
环氧丙烷生产		二氯丙醇反应器、循环槽、缓冲槽；环化塔塔板与浮阀；冷蒸塔栅板、二氯丙醇循环泵、进料泵
乙烯制聚氯乙烯		热骤冷塔、废水冷提塔、废水贮罐
合成脂肪酸生产		C5~C9脂肪酸精馏塔再沸器、C1~C4脂肪酸冷凝器
苯甲酸和苯酐生产		恒沸塔、苯甲酸精馏塔及冷凝器
顺酐生产		恒沸塔、冷凝器、蒸发器、汽水分离器、滚筒、成形机
维尼纶生产		醋酸精馏塔、冷凝器、阀门、管件
乙内酰胺生产		二盐反应器、水解器、肟化反应器 二盐水解中间加热器、羟胺冷却器、羟胺加热器 羟胺二磺酸盐加热器、尾气罗茨鼓风机、光亚硝化反应器
涤纶生产		高温洗涤器及冷凝器、高温加热器、屏蔽泵、醋酸脱水塔及阀门、管件
人造纤维生产		塑化槽、电渗析器阳极板

表7.5-37 上海石化用钛

石化装置	钛部件	效果效益
1）3万吨/年乙醛装置（德国引进）	人孔盖板、接管、冷凝器、触媒过滤器、收集器、分离器	
2）3.5万吨/年醋酸装置	脱高沸物塔顶冷凝器 脱低沸物塔顶冷凝器 脱水塔内件	代替超低碳含钼不锈钢，解决高温醋酸中甲酸、氯离子等杂质引起的严重腐蚀问题，提高设备使用寿命，避免溶入金属离子，影响产品色度
3）2.5万吨/年对苯二甲酸低温氧化法生产装置（日本引进）	高温加热器、洗涤罐、冷凝器、脱水塔	解决160℃以上醋酸对317L不锈钢严重的点蚀与焊缝腐蚀问题
4）2.25万吨/年精对苯二甲酸（PTA）高温氧化法生产装置（日本引进）	氧化反应器、加氢反应器、塔器、溶解器、冷却器、醋酸精馏塔、换热器、贮罐、泵、阀、管道、吸附塔、鼓风机叶轮、抽提液浓缩器、进出口蝶阀、四溴乙烷管道	解决高温含溴醋酸的腐蚀问题
5）20万吨/年聚脂装置（日本引进）	第一脂化冷凝器	
6）15万吨/年乙烯生产用海水冷却装置	冷凝器、冷却器、压缩机工业水冷却器、热电厂冷凝器海水侧	解决含盐富氧含泥砂菌藻杂物的海水介质引起的铜合金管材腐蚀穿孔、胀口泄漏问题
7）350万吨/年炼油装置	常减压的常顶与初顶油气空冷器进口内衬	解决采用中东富硫原油带来的管口涡流冲蚀问题

5）合成纤维生产 对苯二甲酸以聚酯纤维为原料，采用对二甲苯氧化法或芳香族羧酸转位法生产出来的。对二甲苯以一步液相空气氧化法生产时，醋酸为溶剂，在溴化物存在的条件下，用钴、锰等金属的有机盐作催化剂，压力约8.1 MPa（80 atm，温度达200℃左右。这个反应系统的反应器、冷凝器及溶剂回收系统，均需使用钛材。它利用了钛在高温、高压下抗溴化物溶液点蚀的特性。在反应塔中，搅拌机的搅拌轴与衬套，承受较大荷载，采用钛合金制造。压力容器壳体使用钛复合板的多层圆筒结构及单壁结构。对苯二甲酸反应器结构见图7.5-14。

5.3 钛在基本化工中的应用

硝酸、硫酸、盐酸、纯碱和烧碱是五大基本化工产品。它们在生产中会发生严重的腐蚀问题。以钛取代钢、不锈

钢、石墨等传统材料做其生产设备，常可以收到很好的效益。基本无机化工用钛情况见表7.5-38。

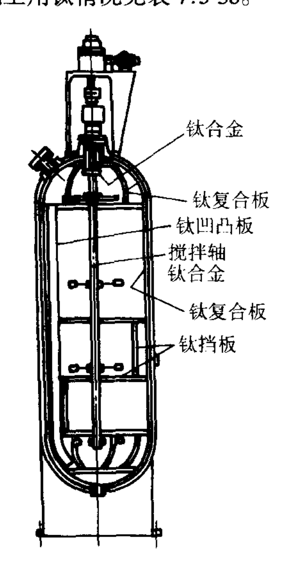


图7.5-14 对苯二甲酸反应器简图

表7.5-38 基本无机化工用钛情况

硝酸生产	硝酸蒸发器、氧化氮尾气预热器、硝酸蒸气预热器、汽体洗涤塔、快速冷却器、冷凝器、涡轮鼓风机、泵、阀、管道等
硫酸生产	二氧化硫吸收工序中 SO_2 风机、酸水泵、静电除尘钛阳极、电解滚塑计的离子氮化、钛阳极
王水生产	钛泵
盐酸	氯冷器
制碱	金属阳极电解槽、离子膜电解槽 阳极液泵、湿氯冷却器、精制盐水预热器 脱氯塔、氯气冷却洗涤塔
漂白粉生产	氯化桶、离心机
次氯酸钠生产	冷却盘管、次氯酸钠成品泵
氨碱法生产	平板换热器、伞板换热器、平板冷凝器、结晶外冷器、盐水泵、卤水泵、氯化铵母液加热器、泵、阀门、碳化塔冷却管、蒸馏塔顶氨冷凝器、CO_2 透平压缩机转子叶轮
联碱法生产	结晶外冷器、氨盐水冷却器、碱液泵、母液预热器、CO_2 透平压缩机冷却器

1）盐酸生产用钛 盐酸用于医药、漂染、调味品、氯化物和金属加工工业。盐酸的生产工艺为：在光或热的作用下，纯净氢气在氯气中燃烧，生成氯化氢（HCl），溶于水而成盐酸。

在一定浓度的盐酸中，钛及钛合金有较好耐蚀性，可用钛做盐酸与氯化氢的氯冷器。

2）硝酸生产用钛 硝酸用于制造化肥、医药、炸药、塑料等多种产品和金属加工业。其生产方法为氨氧化法：在800℃下将10%NH_3 和90%空气混合，通过铂铑合金网转化为NO；再用空气将其氧化成 NO_2，溶于水而得硝酸。NO，NO_2、HNO_3 都有很强的腐蚀性。但钛在氧化性的硝酸及其氮氧化物中耐蚀性好。在165℃、65%HNO_3 中，其腐蚀率为0.08 mm/a，在35℃ 98%HNO_3 中，腐蚀率为0.002 mm/a，故钛适于制造硝酸生产设备。但在硝酸中要注意 NO_2 和 H_2O 含量，以防发生爆炸事故。

3）硫酸生产用钛 硫酸大量用于化肥、有机合成、石油炼制和冶金工业。

硫酸生产主要采用接触法：硫铁矿经焙烧生成 SO_2，在450℃的 V_2O_5 催化下，在接触器中产生 SO_3，用硫酸吸收并加水调节得98% H_2SO_2 或含20% SO_2 的发烟硫酸。SO_2、SO_3、H_2SO_4 都产生腐蚀。

在316℃下，钛在 SO_2 和 SO_3 混合气中的腐蚀率为0.005 mm/a，大大低于316型不锈钢的腐蚀率为（0.21 mm/a），钛可用于某些硫酸生产设备，如 SO_2 风机、酸水泵等。

4）纯碱生产用钛 纯碱用于冶金、建材、轻工、纺织、医药卫生、石油等各工业部门和日常生活，是非常重要的基本化工产品。

纯碱生产方法有氨碱法和联碱法两种。两法生产中的盐水制备、吸氨、碳酸化和分离工序都存在NaCl的腐蚀作用。在吸氨、碳酸化、分离、煅烧炉气回收工序和整个氯化铵系统中都存在氯化铵的腐蚀使用。在有些工序中还存在氯化钙、碳酸铵、碳酸氢铵的腐蚀。316型不锈钢在沸腾20% NaCl和25%NH_4Cl 溶液中的腐蚀率高达0.13～1.3 mm/a，而钛在沸腾饱和NaCl溶液中的腐蚀率仅为0.001 3 mm/a，在沸腾饱和的 NH_4Cl 溶液中无腐蚀。因此，钛是纯碱生产的理想材料。

例如，大连化工厂用铸造TC4钛合金泵代替铸铁泵，寿命提高8～10倍，上海浦东化工厂在生产中采用钛管做氯化铵结晶器，传热效率提高84.2%，生产能力提高29.4%。天津碱厂采用2.7 m^2 钛伞板换热器用于吸氨塔循环圈，代替铸铁喷淋冷却管，传热效率提高6～8倍。

大连化学工业公司碱厂年产纯碱72万吨，生产方法为氨碱法和联合制碱法，从70年代后期开始使用钛设备，取得很好的效果，详见表7.5-39。

表7.5-39 大连化学工业公司纯碱生产用钛实例

设备	钛部件及功用	钛产品规格、数量	效益
1）氨冷凝器冷却管	钛管替代铸铁管，解决 NH_3、CO_2、H_2O 蒸汽（管外）和 NH_4Cl 用液（管内）双面腐蚀问题。铸铁管1年部分穿孔，3年要全部更换	ϕ60 mm×2 mm×3 010 mm纯钛管	1）使用14年无泄漏，预计使用20年以上 2）传热效率稳定，节约待定 3）节省检修费用 4）一年可收回投资，年效益15.6万元/吨钛

续表 7.5-39

设备	钛部件及功用	钛产品规格、数量	效益
2）碳化塔上下部冷却箱	钛管替代铸铁管，解决 $NaHCO_3$、氨盐、CO_2（管外）和海水（管内），双面腐蚀问题。铸铁管2年部分穿孔，3年要全部更换	ϕ63 mm×2 mm×3 010 mm纯钛管1983年用170 t钛管更换4个冷却箱。1981年用8 t钛更换一个塔的冷却箱	延长寿命，减少泄漏，节约检修费用，改善操作环境
3）CO_2 透平压缩机转子叶轮	替代35CrMoV低合金钢叶轮，解决叶轮1、3级叶片不耐 CO_2 水雾腐蚀与冲刷问题。合金钢叶轮经防腐处理后三个月要检修，运转一年要更换	用精铸TC4叶轮（重120 kg），氨碱法4台用钛，联合制碱法1台用钛	1981年开始投产来，运行良好，预计可用26年以上
4）CO_2 透平压缩机油冷器	钛板式换热器替代钢制列管式冷却器，解决钢不耐海水腐蚀问题	氯碱法的透平、压缩机共用8台钛板式换热器。	1984年以来运行良好
5）氯化铵母液冷却结晶器的外冷器	钛制外冷却代替钢制外冷却。钢外冷却不耐氯化铵腐蚀，寿命仅1～4年	每台外冷器用 ϕ51 mm×2 mm×6 000 mm纯钛管500多根，共用11台	1980年开始使用，效果良好，预计可用30年
6）氨碱法重碱车间冷却器	用钛伞板冷却器代替铸铁淋洒式排管冷却器，解决海水及海水蒸气腐蚀问题	TA2钛板，每台冷却面积60 m^2	换热效率提高6倍，每台每年节约5万元
7）碱母液8S泵叶轮和泵体	用钛泵代替铸铁泵，解决腐蚀问题	采用24台钛泵	1973年用于叶轮 1983年用于泵体
8）碳化塔出碱口阀门和连接管阀门	用钛阀代替铸铁阀。铸铁阀寿命2～6月	用 ϕ100 mm钛截止阀15个 ϕ200 mm阀门12个	1989年以来运行好，每年节约30万元

5）烧碱生产用钛　广泛用于化工、冶金、纺织、造纸等工业部门。生产方法有隔膜法、水银法和离子交换膜法。在隔膜法和水银法中阴极处于氯化钠、氯、氢氧化钠、次氯酸、盐酸、次氯酸钠、氯酸钠等多种介质的高温腐蚀之下。用石墨做阴极，不耐冲刷和侵蚀，一般半年就报废。钛非常耐氯的腐蚀，适于做钛阳极及其他配套设备。

例如，湿氯冷却器采用石墨，寿命仅6个月，而用钛之后，十几年不见腐蚀，每台钛湿氯冷却器每年可多回收240 t氯气，节约干燥硫酸250多吨，节水7万吨，经济效益达5万元。

6）氯气干燥工程用钛　某厂氯碱车间氯气干燥工序采用钛管热交器替代玻璃管热交换器，由于钛管的导热系数比玻璃管大得多，冷却效果好，电解槽中出来的高温湿氯气中所带的水分，绝大部分在钛管中被冷却下来，有利于随后的浓硫酸干燥脱水。在浓硫酸干燥时的耗酸量由原来的70～80 kg/t下降到20～30 kg/t。同时，减少了设备的检查和停产。钛管换热器只要每年大修时清洗一次就可重复使用，钛管换热器虽然比玻管换热器一次投资大，但长期效益好。

5.4 钛在其他化工中的应用

化肥、农药、医药、无机盐及染料用钛概况见表7.5-40。

表7.5-40　其他化工生产用钛

化工产品类型		钛设备
化肥	尿素	尿素合成塔衬里、氨汽提塔、分解塔加热器、甲氨泵进、排液阀与弹簧、高压混合器
	硫铵	硫氨蒸发器
	氯化铵	氯化铵浓缩蒸发器、预冷器、真空结晶器、冷凝器、喷射器、离心机、吸滤器、漏斗
	钾肥	
	复合肥	氯化钾溶液换热器、泵、阀
	硝酸氨	反应器、鼓泡器、硝酸给料管、预热器、喷射泵、阀、管道
	氨水（15%～17%HN_5）	氨反应塔衬里、筛板、氨预冷器、食盐水容器
	碳铵	氨水泵、异径管
农药	666	“666”合成液冷却器、氯化釜内衬、冷却蛇管、蒸馏罐放料阀、旋塞、管件、洗苯器
	乐果	中间体反应罐、冷凝器、搅拌器、流量计、温度计套管、阀门
	敌鼠钠盐	醋酸、醋酐回收装置
	马拉硫磷	湍流吸收塔、恒沸塔、浓酸气液分离器、酸水蒸发冷凝器
	敌百虫	反应器、洗涤器、换热器
医药	维生素B1	干燥装置中的螺旋加料器、旋风分离器、旋蜗体、袋滤器、加热器、粉碎机
	维生素C	古龙酸列管换热器、自动排渣离心机、冷冻盐水泵叶轮

续表 7.5-40

化工产品类型		钛设备
医药	葡萄糖	薄膜蒸发器、转化锅
	抗菌素	氯霉素回收装置中的升膜蒸发器、列管预热器、旋风分离器、链霉素生产中的发酵液离心机
	解热、镇痛药	安乃静水解换热器、对酮硝化反应锅换热器、咖啡因反应罐框式搅拌器、列管与盘管换热器、非那丁西汀生产中的分馏柱
无机盐	氯化物（$MgCl_2$、$BaCl_2$、$MnCl_2$、$CuCl_2$、KCl、液体 $CaCl_2$ 等）	反应器、结晶器、换热器、蒸发器、洗涤器、吸收器、压滤机、泵、阀、管件、预热器、干燥器、离心机、通风机
	溴化亚铁	蒸发器、吸收器、喷淋器、风机、泵等
	碘化钠	蒸发器、溶解槽、吸滤器
	硫酸铝	蒸发器
	氯酸钾	醋酸回收塔
	硝酸盐（硝酸铅等）	反应釜、泵、阀、管道
	酪酐及酪盐	酪酐熔体反应器衬里、溶解器、反应器、泵、阀；硫酸铬、氯化铬、硝酸铬的反应器、容器、泵、阀、管道
	其他制盐	氨蒸发器、预热器、预冷器、泵、法兰、首效加热室
染料		蛇管加热器、吸收塔、净化塔喷头、风机、水环或真空泵、过滤器等 偏苯三酸酐氧化塔 漂白粉生产用横壁小刮板

1）钛在化肥工业中的应用　化肥分为氮肥、磷肥、钾肥和复合肥，氮肥产量最大，它包括尿素、硝酸铵、氨水、碳铵、硫铵、氯化铵等。复合肥为同时含有两种以上的氮、磷、钾主要营养素的肥料，如硝酸钾、硝酸磷肥等。

尿素［$CO(NH_2)_2$］是最广泛使用的中性高效氮肥，它是氨（NH_3）和二氧化碳（CO_2）在高温高压下反应而成的，中间产物为氨基甲酸铵（也称氨钾酸酯）。在工业设备中，反应塔在 180～200℃、15.2～25.3 MPa（150～250 atm）下运转，腐蚀作用强。

在尿素设备中，曾用镀铅或银作为衬里材料，但由于中间产物氨基甲酸铵的腐蚀性强，设备寿命短。国内外比较广泛采用的是 AIS316L 型不锈钢，但使用效果不是令人满意。它存在以下几个问题：

① 使用温度不能过高，必须控制在 190℃以下。否则，腐蚀速率会急剧增加。若为了提高合成转化率而提高合成塔反应温度，不锈钢就不能使用了。

② 不锈钢在缺氧时对腐蚀敏感。由于各种工艺原因或操作不当，甲铵分离器等设备会出现局部缺氧，使不锈钢钝化不足或进入活化状态，加速腐蚀。

③ 在热处理不当时，不锈钢会出现晶间腐蚀和选择性腐蚀倾向。

④ 不锈钢的腐蚀疲劳寿命较差。用不锈钢制造的一段甲氨泵寿命仅为半年左右。

合肥通用机械所与尿素研究与生产单位合作，进行钛材挂片试验，最长的一次试验历时 4 年，累计时间 15 000 多小时。获得如表 7.5-41 所示的结果。试验结果表明，在正常通氧情况下，钛在尿素合成中的腐蚀速度要比不锈钢小得多。二者相差几倍到 10 多倍，钛在合成塔中未出现点蚀、晶间腐蚀、选择性腐蚀现象，即钛抗局部腐蚀能力明显优于不锈钢；在合成塔中，纯钛的耐蚀性优于 TC4 钛合金。

另外，试验还表明，在低氧和断氧操作条件下，钛及钛合金的耐蚀性也明显优于不锈钢。在联尿气提塔中，虽然操作温度和压力较低，但氧的溶解度也低，在气液相交界处，不锈钢会发生严重的腐蚀，腐蚀速达到 0.140 mm/a，而钛的腐蚀率仅为 0.060 mm/a，也明显优于不锈钢。国外日本人的实践也表明，使用不锈钢时，若溶解在水中的氧较多，腐蚀比较轻微，若溶解在水中的氧较少，则腐蚀严重，因此必须向合成塔中吹氧。若用钛做成塔内衬，它就不需要吹入氧气。

日本的办法是在合成塔内部安装一个可更换的钛衬套。为使钛衬套更稳定，使用多层圆筒形压力容器。尿素合成塔的结构示于图 7.5-15。其制造方法示于图 7.5-16。多层圆筒衬钛压力容器与整体结构的压力容器相比，具有耐压安全性高（圆筒体内残余应力小，防爆裂性好）、尺寸（容器直径和壁厚）限制小和不需要退火、经济性好等特点。我国采用钛/钢复合板制造尿素合成塔。

表 7.5-41　钛在尿素生产中的挂片试验结果

试验工厂	挂片部位	试验条件	挂片材质及状态	腐蚀速度 $mm\cdot a^{-1}$
泸州天然气化工厂	第二反应器塔顶部	190℃～195℃ 20 MPa 15 151 h 尿素 32%～34% 二氧化碳 10%～11% 氨 35%～36% 水 19%～21%	TA2 + TA2（焊后空冷） TC4 + TC4（焊后空冷） H2 钢 Q255－B 钢 Q255－A 钢 Q255－A + Q255－A 钢（焊后空冷） 00Cr18Ni12Mo2 + M4 钢（焊后空冷）	0.008 0.012 0.116 0.100 0.097 0.108 0.110
南京化工厂	距塔顶 60 cm	180℃ 20 MPa 7 056 h 尿液 30% 甲铵 30% NH_3 20% H_2O 20%	TA2 + TA2 AUS33 + P5 204Mo + 832SKT H2 + H2 H2 + 0Cr18Ni12Mo2	0.046 0.17 0.27 0.42 0.56

在硝酸铵生产中，高温的硝酸、氨、硝酸铵腐蚀性都很强。为了降低介质的易爆性，还加入一些磷酸钙、硝酸镁、硝酸钙，它们也都具有腐蚀性。由于钛在氧化性的硝酸和硝酸氨中耐蚀性很好，故适于制造硝酸铵生产设备，如反应器、鼓泡器、硝酸给料管、喷射泵、阀、管道等。

氨水（含 15%～17%氨）是常用氮肥，也是生产尿素、硝酸、铵盐、医药、合成纤维的原料。钛抗氨腐蚀性较好，可用做氨水生产中的氨预热器、氨反应塔衬里及筛板等设备。

在碳铵（碳酸氢铵）生产中，氨水、碳酸氢铵对设备有腐蚀作用。钛在弱碱性氨水、弱酸性碳酸及中性碳酸铵中很稳定，

因此适于做碳铵生产设备，如铸钛氨水泵、异径管等。

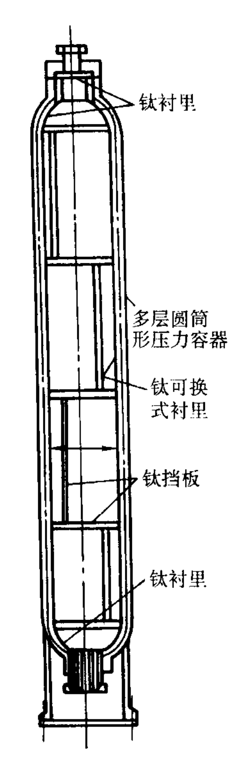


图 7.5-15 钛衬里尿素合成塔简图

硫氨是通过硫酸中和氨水所得。钛在硫酸铵中的耐蚀性优于不锈钢，适于制造硫酸铵蒸发器等设备。

氯化铵是氯气或盐酸与氨水反应所得，不锈钢不耐高温氯化铵的作用，氯化铵浓缩蒸发器的寿命不到3个月。而钛在饱和氨化铵中的稳定性极好，因此适于用做氯化铵生产设备，如预热器、蒸发器、真空结晶器、冷凝器、喷射器、吸滤器、漏斗、离心机等。

钾盐与硫酸反应制得硫酸钾，氨化钾与硝酸反应制得硝酸钾，并生成盐酸。在其生产过程中，会遇到多种酸与盐的腐蚀作用，因此钛适于做钾肥生产设备。

2）钛在农药生产中的应用 "666"即六氯环乙烷，是在紫外线照射下，由苯和氨加工成制取的，反应时还会产生氯苯、微量氯酸和盐酸。在蒸馏工序中，温度达104℃，不锈钢、铅等均不耐蚀。钛适于用做合成盘管冷却器、W型冷却器、下料管、蒸发馏、放料阀、旋塞、蒸气连通管、洗苯器等。一些新农药，如稻田除草剂、杀虫醚、除苯醚、稻瘟净等有机农药，其生产原料都涉及苯和氯，都需要用钛设备来解决腐蚀问题。

乐果是广用农药，它以氯乙酸、盐酸、三氯乙烯、甲醇、五硫化二磷、一甲胺、碳酸氢铵、纯碱为原料，经中间体氯乙酸甲脂、硫化物铵盐及硫磷酯等制成。副产物为硫化氢、二氯乙酸等，工艺介质腐蚀性强。采用钛设备也是很必要的。钛已成功地用做反应罐、搅拌器、冷凝器、流量计、温度计套管、阀门等。

敌鼠钠盐是新型杀鼠药，它以乙酸（醋酸）、醋酐为原料，经过苯基丙酮、溴代苯基丙酮、偏二苯基丙酮缩合而成。其醋酸、醋酐回收装置适于采用钛设备。

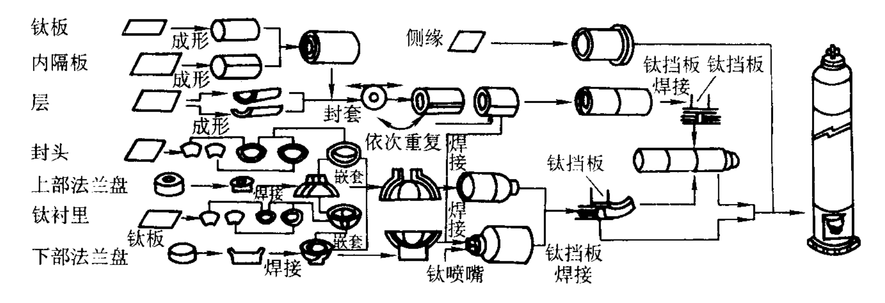


图 7.5-16 钛衬套压力容器制作流程图

3）钛在医药生产中的应用 化学制药厂广泛使用铸铁基和钢基搪瓷生产设备，由于腐蚀作用，它们的平均使用寿命较短（0.5~2.5年），严重影响生产。

化工制药生产中使用的介质通常是一些成份复杂、活性强的腐蚀性混合物。例如，某厂的烯醇化反应器中同时含有三氯甲烷、丙酮、乙醇、氢氧化物和抗坏血酸；在维生素生产厂的冷凝反应槽中同时含有醋酸乙酯、五硫化二磷、甲酰胺、氯乙酸丙脂；而在合成香料的液体蒸馏器中则同时存在工业水杨酸、苯甲醛、水、甲酸、甲酸钠、氯化钠、硫酸钠等。为搞清这些复杂介质对搅拌机壁、轮叶、套管、热电偶、支管和连接管的腐蚀作用，俄罗斯人在4家公司的33台设备上进行了BT1-0、ПТ-3B（Ti-2.5V）、4200（TA9即Ti-0.15Pd）钛合金试样的挂片试验。挂片试验结果列于表7.5-42。

从表7.5-42可以看出，钛及钛合金在上述制药生产介质中的腐蚀速率都是很低的，不出现溃疡腐蚀、麻点腐蚀和腐蚀破裂等局部腐蚀现象。俄罗斯已用BT1-0钛材制成冷凝反应器（1 m³）、氧化反应器（16 m³）、蒸馏器（3.2 m³）、冷凝换热器（$F=50\ m^2$）等制药设备。

但实践表明，有些制药设备不宜用钛材制造。这些设备有：制取气态氯化氢的反应器、制取酰氯的反应器、乙醇吸收氯化氢的反应器、酰溴反应器等。

表 7.5-42 钛及钛合金在不同制药介质中的腐蚀速率

制药生产	设备	腐蚀速度/mm·a⁻¹ 液相	气相
抗坏血酸和山梨糖醇	烯醇化反应器	<0.1	<0.1
	中和器	<0.01	<0.01
	平底器皿	<0.01	<0.01
	冷却器	<0.01	<0.01
	蒸馏器	<0.01	<0.01
	蒸发器	<0.01	<0.01
脂肪	硫化和皂化反应器	<0.001	<0.001
	杯式结晶器	<0.001	<0.001
维他命 B_2 和 C_1	吸收塔	<0.01	<0.01
	醋酸蒸馏反应器	<0.01	<0.01
	醋酸收集器	<0.01	<0.01
	氧化反应器	<0.001	<0.001
香草素和水扬酸酐	液体蒸馏器	<0.001	<0.001
	冷凝器	<0.001	<0.001
	萃取器	<0.001	<0.001
抗坏血酸	溴酸盐反应器	<0.001	<0.001

我国在药生产中用钛已积累了多年的经验，取得了良好效果，例如，以生产化学合成为主的武汉制药厂，生产氯霉素、甲硝唑、安乃近等各种药物，设备接触盐酸、硫酸、硝酸、醋酸等各种腐蚀介质。在浓缩、还原、硝化、水解等一些关键工艺上设备腐蚀，"跑、冒、滴、漏"现象严重，造成环境污染和许多潜在不安全因素。自20世纪80年代以来，在一些工序上采用钛设备之后，情况大为改观，如在氯霉素回收中采用TA10（Ti－0.3Mo－0.8Ni）合金制造升膜浓缩器（包括升膜蒸发器、列管预热器）。

① 维生素　维生素B（盐酸硫铵）用氯化氢转化法生产时，成品干燥采用旋风机。旋风机等干燥装置的工作，介质为盐酸硫胺，并含1% HCl与2% H_2O，pH＝2.5，温度110℃，腐蚀性很强。不锈钢干燥装置不耐蚀，使用1.5年就严重点腐穿孔，并污染药品。然而钛在此工况下却十分耐蚀，腐蚀率低于0.003 mm/a，用钛制做螺旋加料器、旋风分离器、旋涡体、料斗、出料管及尾气箱衬里等，收到非常好的效益。仅三个月就收回钛设备投资。

维生素C也用氯化氢转化法生产。在生产过程中会产生腐蚀性的古龙酸。例如，某厂古龙酸发酵液过滤液的温度为80℃～90℃，pH值为2～3，腐蚀性很强，离心机工作压力10.1 MPa（100 atm），转速4 500 r/min。采用钛制自动排渣离心机，使用效果良好。

② 抗菌素　氯霉素生产的原料是二氯乙醋甲酯，含有约2%二氯乙烯、三氯乙烯。精馏塔设备内的波纹填料材质由不锈钢改为钛材，使用效果良好。

链霉素生产时，发酵液含有草酸，温度为80℃，pH值为2，腐蚀性很强。采用DHC－500钛制转毂离心机分离，效果良好。

③ 解热镇痛药　磺胺生产时，要将氨中和母液用蒸气加热到120℃，母液中含硫酸铵28%～30%，氯化铵6%～7.5%，pH＝4.5～6。母液要经减压蒸发、浓缩、结晶、离心分离后得成品。不锈钢蒸发器使用2个月就会发生应力腐蚀破裂现象，而钛管蒸发器可长期使用。

咖啡因生产时，要以氰化钠、盐酸、醋酸、尿素为原料，在100℃下反应，生成氰乙酰脲中间体。该工艺的反应罐受腐蚀严重，反应罐的不锈钢搅拌器，使用不到一年就会报废，而钛制框式搅拌器可长期使用。

4）电影胶片洗印设备用钛　电影拷贝的设备要求耐蚀，防止设备腐蚀污染物危害拷贝质量。

高温快速彩底显影机的漂白槽原用塑料、不锈钢。漂白液的主成份是铁氰化钾和溴化钾，具有腐蚀性。塑料耐蚀但易老化破损，不锈钢强度高但不耐蚀，只能使用2个多月。采用钛制漂白槽（（300～600）mm×150 mm×1 070 mm）后，漂白槽经久耐用。输片清轮主轴也接触漂白液，过去采用橡皮包不锈钢结构，使用寿命也仅500天，改用钛合金轴（Ti－7Al－4Mo合金）后，寿命延长，效果很好。我国西影、珠影、八一、峨嵋等电影制片厂现在均采用钛制拷贝设备，效果良好。

5）水处理用钛　在水处理过程中要用许多化学药品，如柠檬酸、硫酸铝、PAC、次氯酸盐、苛性钠、氯气等。除干氯气外钛对这些化学药品，都有良好的耐蚀性，适于做水处理的储罐材料。另外，钛无毒，纯钛与不锈钢不同，它不含铬、镍这些可能引起人体过敏的金属元素。钛储罐废弃之后，还可以再生利用，不污染环境。

日本某公司已开发出了一种全钛化药贮罐。贮罐材料为2 mm厚的JIS2类纯钛板（相当于TA1～TA2），有效容积达200 L。它具有如下特点：

① 耐蚀质轻，经久耐用。钛不仅比强度比钢高，而且耐蚀性好，其壁厚可以不考腐蚀余量，因此钛贮罐比钢或不锈钢贮罐轻。

② 采用特殊的加强肋结构，即在贮罐筒体圆周面上压制出刚性肋，刚性肋的数量可根据贮罐的容量任意设置，不需要再用薄板做加强肋。贮罐的上下封头采用冲压加工，筒体与封头用TIG焊接。焊接接头的强度与基材大致相同。

③ 罐内设置药液防晃装置，若发生地震，贮罐内化药液面会摇动，影响贮罐筒体及附属设备。为此，在罐内设置了格栅状装置，它能抑制罐内药液摇动，也能提高贮罐的刚度。格栅的数量可根据贮罐容量任意设置。

④ 贮罐内设置了监视用的观察窗。化药长期贮存过程中，杂质、水垢、污染物等会产生沉淀，沉淀物堆积会堵塞管道，使化药不能正常流动，影响整个水处理过程。为此，在贮罐内设置了监视用的观察窗。两个观察窗设在贮罐下部，相向设置，用带透明强化玻璃的阀盖固定，便于贮药罐内部的检查。

5.5　钛设备应用的经济效益分析

钛能否在各化工行业应用，关键在于它的技术经济效益。钛材的价格比钢、铝、铜、不锈钢的价格要贵几倍到十几倍，钛设备的初次投资比较大，许多用户因而怯步。要阐明用钛的好处，需要全面地、科学地计算使用钛设备的经济效益。钛设备的最大优势在于它的耐蚀性好，使用寿命长，表7.5-43列出了钛与被取代材料的使用寿命对比，计算钛设备的使用效益时，必须对钛设备的使用寿命进行分析。

表7.5-43　各种材料使用寿命比较

应用行业	设备名称	原用材及寿命	钛材及寿命	用钛后寿命提高倍数
氯碱	氯碱湿氯冷却器	石墨3～6月	纯钛已投运10年以上	20
纯碱	外冷器	碳钢6～24月	钛材15年以上	7.5
冶金	铜电解阴极板	铜1～3年	纯钛10年以上	3.3
	钨酸蒸发锅	搪瓷3年	纯钛已投运14年以上	4.7
制药	吡唑酮换热器	铅管2月	纯钛已投运7年以上	4.2
制盐	芒硝氨蒸发器	碳钢8月	纯钛已投运10年以上	15
化工	醋酸氧化塔	不锈钢1月	纯钛10年以上	120
石化	醋酸精馏塔	Mo2Ti 1.5～2年	钛材预计15年	7.5

钛设备替代传统设备每年的综合经济效益可按下式计算：

$$E = -e_1 + e_2 + e_3 + e_4 + e_5 + e_6 + e_7 + e_8 + e_9$$

式中，E为钛设备取代传统设备1年的综合经济效益；e_1为钛设备每年的折旧费用（一次投资费/使用寿命）；e_2为被取代设备每年的折旧费用（一次投资费/使用寿命）；e_3为每年节省的检修、更换与维护费用，包括避免停车省下的检修、防腐堵漏及更新设备的拆装费用，日常维护、阴板保护、缓蚀剂费用；e_4为每年减少原材料消耗费用（避免停车省下的物料排空费等）；e_5为每年产品质量提高价值（产品升级的效益）；e_6为每年产品增产价值（避免停车减产、劳动效率提高等）；e_7为采用新工艺一年的经济价值（采用

钛材后强化工艺参数带来的效益)；e_8 为每年节能费用（总传热系数提高，转动机械动能减小)；e_9 为每年节约的环保费用（减少设施与排污费)。

化工中采用钛的经济效益计算有许多典型实例。例如，在纯碱生产中，氨冷凝器（将蒸馏塔蒸出的氨气冷凝的设备）采用钛管代替铸铁管的效益对比见表 7.5-44；外冷器用钛管代替铸铁管的效益对比见表 7.5-45。电厂凝汽器用钛管代替铜合金管的效果比表见 7.5-46。

在压缩机中采用钛合金叶轮转子代替合金钢风叶轮转子，每年可增产纯碱 1.6 ~ 1.8 万吨，增加产值 800 ~ 1 000 万元。

表 7.5-44　纯碱生产中钛管冷凝器与铸铁管冷凝器的效益对比

项　目	钛　管	铸铁管
设备费/元	180 000	24 000
使用寿命/a	>20	2
全年折旧费/元	9 000	12 000
全年节约/元	3 000	0
每台生产能力/t·d^{-1}	400	400
平均每吨纯碱节约蒸汽/t	0.3	0.15
年节约价值/万元	33.66	15.33
年收益/万元	15.33	0
全年总收益/万元	15.63	0

表 7.5-45　钛制外冷器与钢制外冷器经济效益比较

项目	钛外冷器	钢外冷器
整台设备造价	96 万元	13 万元
使用寿命	预计 30 年	4 年
全年折旧	32 000 元	32 500 元
全年节约	500 元	0
全年增产	336.5 t 氯化铵	0
全年利润	10 095 元	0
全年收益	10595 元	0

表 7.5-46　凝汽器用钛管和铜管的一次性投资对比

项　目	钛管（TA2 无缝管）	B10	B30
密度/g·cm^{-3}	4.5	8.9	8.9
规格/mm	ϕ25 × 0.5 × 7 575	ϕ25 × 1.0 × 7 575	ϕ25 × 1.0 × 7 575
管材数量/支	11 968	11 968	11 968
每支质量/kg	1.57	5.08	5.08
设备总质量/t	18.8	60.0	60.0
材料单价/元·kg^{-1}	160	18	30
设备总价/万元	300.8	109.4	182.4
使用寿命/年	40	2 ~ 3	2 ~ 4
设备的年平均投资/万元	7.52	36.5	45.6
40 年投资/万元	300.8	1 460	1 824

5.6　钛设备的设计与制造

5.6.1　钛设备设计的安全规则

钛是一种优质结构材料，但必须正确使用，否则达不到预期效益，甚至引起严重后果。

钛在某些条件下会发生氢脆、缝隙腐蚀、应力腐蚀、自燃爆炸等安全问题，在钛设备设计、制造、使用过程中，特别是设计过程中要遵守若干安全规则：

1）避免发烟硝酸。钛不能用于高浓度（>98%）硝酸或高游离二氧化氮（>6%）的发烟硝酸。

2）避免干氯气。钛不能用于水含量为 0.1% ~ 0.3% 干氯气，即国产钢瓶氯气，否则会因干氯气与钛作用，生成 $TiCl_4$ 放出大量热而着火。

3）避免液氧和某些氧分压高的水溶液。钛在液氧中有冲击、摩擦敏感性。如果产生钛的新鲜表面，在 0.35 MPa 压力、室温时就会自燃。

4）避免氢脆。钛表面受铁污染，会促进氢扩散，加速钛从环境中大量吸氢，造成氢脆危险。

5）避免超温使用。钛设备比较适宜的工作温度范围应为：纯钛低于 250℃，钛衬里低于 200℃。在氧化气氛中使用的全工业纯钛设备，使用温度可高一些，但不宜超过 450℃。

6）结构设计时要最大限度避免缝隙和可以存水的凹处。例如，可采取一些措施：用焊接代替胀接或螺栓连接；用对接焊代替搭接点焊。

7）钛钢联合使用，要注意热膨胀系数差引起的热应力，防止局部热应力过大而造成结构破裂。

8）要合理选材。一般来说，在氧化性介质中，应选用工业纯钛。对板式换热器，应选用强度较低但冷成形性最好的 TA1 钛板材；对管式热交换器，管材应用强度、塑性、可焊性居中的 TA2 钛材，而管板则用强度较高的 TA3 钛材；钛容器常根据强度与可焊性的要求选择 TA2 或 TA3 钛材。在非氧化介质（中性或还原性介质）中，则宜选用耐蚀钛合金。例如，在易发生缝隙腐蚀的条件（高温、高浓度氯化物）下，部件最好选用 TA9（Ti - 0.2Pd）合金或 TA10（Ti - 0.3M0 - 0.8Ni）合金。TA9 合金的价格比 TA10 合金高，但耐蚀性更好。在高温高浓度的硝酸介质（强还原性介质）中，则需选用 Ti - 5Ta 型合金；而在高浓度的硫酸介质中，则宜选用 Ti - 32Mo 合金。Ti - 32Mo 合金是高合金化的 β 型合金，耐蚀性好，但加工性差，熔炼时易产生偏析。对新型化工设备，在设计选材时，除查看钛的腐蚀数据外，还必须预先做挂片试验，确认钛材的耐腐蚀性和使用的可靠性，因为介质中的某些微量杂质可能对钛的耐蚀性产生重大影响，即可能起缓蚀作用，也可能起增蚀作用。因此，设计师对钛材的选用一定要慎重。

5.6.2　钛材标准

钛材标准是钛设备设计与制造的基本技术规范之一。我国从 1970 年开始制定钛材标准（冶金部标准 YB761 ~ 767—1970)。在 20 世纪 80 年代和 90 年代又先后进行了全面修订，从而形成了大体与国外先进水平相当的钛材标准。化工设备制造涉及的钛材标准有 20 多个，详见表 7.5-47。

表 7.5-47　化工常用钛材标准

标准号	标准名称
GB/T 2965—1996	钛及钛合金棒材
GB/T 3620.1—1994	钛及钛合金牌号和化学成分
GB/T 3620.2—1994	钛及钛合金加工产品化学成分及成分允许偏差

续表 7.5-47

标准号	标准名称
GB/T 3621—1994	钛及钛合金板材
GB/T 3622—1999	钛及钛合金带、箔材
GB/T 3623—1998	钛及钛合金丝
GB/T 3624—1995	钛及钛合金管
GB/T 3625—1995	换热器及冷凝器用钛及钛合金管
GB/T 4698.1 ~ 4698.25—1996	海绵钛、钛及钛合金化学分析方法
GB/T 5168—1985	两相钛合金高低倍组织检验方法
GB/T 5193—1985	钛及钛合金加工产品超声波探伤方法
GB/T 6612—1986	重要用途 TA7 板材
GB/T 6613—1986	重要用途 TC4 板材
GB/T 6614—1994	钛及钛合金铸件
GB/T 8180—1987	钛及钛合金加工产品的包装、标志、运输和贮存
GB/T 8546—1987	钛－不锈钢复合板
GB/T 8547—1987	钛－钢复合板
GB/T 12969.1—1991	钛及钛合金管材超声波检验方法
GB/T 12969.2—1991	钛及钛合金管材涡流检验方法
GB/T 13149—1991	钛及钛合金复合钢板焊接技术条件
GB/T 14845—1993	板式换热器用钛板
GB/T 15073—1994	铸造钛及钛合金牌号和化学成分
GB/T 16598—1996	钛及钛合金饼和环
GB/T 6887—1986	烧结钛金属过滤元件和材料

5.6.3 钛设备规范

钛设备的设计与制造应遵循钛设备规范。

从安全角度出发，钛设备分为4类。

1）受“压力容器安全监察规程”监察的钛压力容器设备，它包括各类高压、高温和大容积的钛反应器、换热器和蒸发器等。

2）不受“压力容器安全监察规程”监察的钛压力容器设备，它是不同时具备高压力、高温度、大容积三项指标的钛设备。

3）通用机械设备。如钛风机、钛泵、钛阀门、钛管接头等。

4）特殊或专用钛设备和零部件，如医疗钛骨头、电影行业的钛洗印设备、饮食行业的钛过滤器等。

3）、4）类钛设备遵循各个类别的行业技术规范及标准，具体的技术要求在产品图样中体现。1）、2）类钛设备的设计、制造、使用、质量检查、包装运输等应遵循或参照下列技术规范：

1）国家劳动总局“压力容器安全监察规程”；

2）劳动人事部“锅炉压力容器安全监察暂行条例”实施细则；

3）“钢制石油化工压力容器设计规定”；

4）“钢制列管式换热器设计规定”；

5）JB 741—1980“钢制焊接压力容器技术条件”；

6）JB 1147—1980“钢制列管式换热器技术条件”；

7）JB 4745—2001“钛制焊接容器”的行业标准；

8）JB 4730—1994“压力容器无损检测”标准；

9）GB 151—1999“管壳式换热器”标准；

10）陕 DB 3464—1986“钛制焊接压力容器技术条件”；

11）陕 DB 3465—1986“钛制列管式换热器技术条件”；

12）陕 DB 3466—1986“钛制容器包装、运输”标准；

13）CD 130A8—1987“钛制设备设计技术规定”；

14）CD 130A9—1987“钛制设备技术条件”；

15）JB4745—2001“钛制焊接容器”。

美国 1977 年已将钛制压力容器归入 ASME 规范之中。日本 1981 年将钛制压力容器列入 JIS 压力容器规范，现行主要标准是 JISB8270。也就是说，美国、日本是将钛制压力容器与钢和其他材料的压力容器共同置于一个总的压力容器规范之中。

俄罗斯将钛制压力容器单独列成标准，共有 8 个标准，如“钛和钛合金焊制容器和设备一般技术要求”（ГОСТ 26 - Ⅱ - 85）、“钛制容器和设备强度计算方法和规定”（ГОСТ 26 - 01 - 771）、“钛制容器和设备法兰的结构和尺寸、强度和密封的计算方法”（ГОСТ - 01 - 1298 - 81）、“钛制容器和设备强度计算方法和规定”（РД24 - 200 - 17 - 90）、“钛和钛合金容器和设备低周载荷的强度计算方法和规定”等。但俄罗斯尚无钛制压力容器国家标准。

法国在“法国压力容器建造规范”（CODAP - 90、CODAP - 95（E））中对钛容器规定了安全系数。英国在“化工容器和设备的衬里”规范（CP3003）中有“衬钛化工容器和设备制造”的规范内容。

国外的这些标准对我国钛设备的设计、制造、使用都有参考价值。我国的钛设备规范也需要在实践中不断充实与完善。了解与掌握国外钛设备规范，对我国实现钛的应用技术与国际接轨，引进国外钛设备和扩大钛设备出口都有重要意义。

5.6.4 钛设备制造技术

（1）工艺方法的选择

钛设备制造同钢铁等金属材料设备的制造一样，一般有三种工艺方法：①成形一机加一焊接法；②铸造法；③粉末冶金法。成形法可制备大型的、任意复杂程度的钛设备，是最主要的工艺方法。铸造法和粉末冶金法适于制造尺寸较小，形状不十分复杂的设备或零部件，但具有工艺流程短，大批生产时成本较低的特点。大型化工设备一般都要经过压力成型、机械加工、焊接等工序。而钛泵、钛阀门、钛风机、钛叶轮等小型单体设备常采用铸造法生产。钛过滤器等具有特殊性能要求的产品，则用粉冶法制造。

由于钛具有特殊的物理、化学、力学特性，它的工艺特性也与其他金属材料有所不同，在钛设备制造中，要特别加以注意。

（2）钛的压力成形

在钛材通过压力成形（弯曲、冲压、胀型、翻边等）工序制造钛设备时，必须了解钛的下列特性：

① 纯钛的强度与软钢相近，但屈服强度高，因此所需的成形应力较大。

② 屈强比大（在退火状态下 $\sigma_{0.2}/\sigma_b = 0.8 \sim 0.9$），因此允许的塑性变形范围较窄。

③ 弹性模量较小，仅为软钢或不锈钢之半，弹性模量与屈服强度之比小，冷压成形时回弹大。弯曲回弹约为不锈钢的 1 ~ 2 倍。

④ 伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 较低，对冷态变形不利。当变形量大时，应多次成形，并进行中间退火。

⑤ 加工硬化指数（n 值）低于其他金属，不利于弯曲、胀形、翻边，但易进行小 R 角成形。

⑥ 塑性各向异性值（γ 值）很大，有利于深冲成形，而不利于弯曲成形。在加工成形时应尽量引入深冲因素。

⑦ 各向异性较明显，垂直轧制方向弯曲比平行轧制方向弯曲性能好。

⑧ 对变形速度敏感性强，因此复杂的冲压工序应在低速下进行。

⑨ 可进行等温锻造成形或超塑性成形，但生产效率低，成本较高。此方法一般只适于航空高性能件成形，而不适于普通化工产品成形。

⑩ 对切口及表面缺陷的敏感性高，所以在压力加工前，坯料必须彻底清除划痕、裂纹、氧化皮等缺陷。

⑪ 与其他金属接触的黏结力强，摩擦因数大，压制成形时易被划伤，并产生与模具黏结等现象。

⑫ 加热成形时，易与空气中的气体（氧、氮、氢）起作用，发生吸气、氧化现象，使钛材质被污染而降低力学性能与成形性能。

纯钛的某些力学和工艺性能与其他材料的比较见表 7.5-48。

表 7.5-48 纯钛板材的性能与其他金属板材性能的比较

材料	弹性模量/GPa	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ/%	n 值	γ 值	杯突值
纯钛	105	380	300	40	0.145	4.27	9.7～12.5
纯铝	70	80	35	44	0.243	0.62	10.6
不锈钢	203	850	300	70	0.404	1.01	13.0

纯钛成形性特点见表 7.5-49。

表 7.5-49 纯钛成形加工的特点

钛的特性	对成形性的影响					问题或特点	改进方法
	弯曲	胀形	冲压	翻边	卷制		
屈服强度/弹性模量比值大	×				×	弹性回复大难以成形	使用软质低氧材料和合适的成形条件
n 值小	×	×		×		临界变形量低	使用软质低氧材料，增大晶粒直径
	◎					◎	易进行小 R 角成形
	×				×	易因局部变形引起凹凸	合适的成形条件，加大晶粒直径
r 值大			◎◎			比深冲用软钢板好	
	×					临界弯曲半径大（薄板可以叠合弯曲）	使用软质低氧材料

注：◎◎很有利点；◎有利点；×不利点。

1）弯曲成形 弯曲是制备钛设备最常见的成形方式。它是一种塑性变形与弹性变形相结合的成形工艺。在弯曲过程中，钛材内侧受压，外侧受拉。边缘压力最大，中线应力为零。从而一部分产生塑性变形，另一部分产生弹性变形。卸载以后，弹性变形就力图使工件恢复原来形状而回弹。影响回弹量的因素很复杂，与材料的力学特性（$\sigma_{0.2}$，E）、材料的厚度 S（或直径）、变形程度（弯曲半径 r 与材料厚度 S 比值）、弯曲工件的形状（单角弯曲或多角弯曲）、弯曲方法（自由弯曲或模子冲弯）、弯曲条件（温度、速度）等诸多因素有关。

但从统计试验的结果来看，一般纯钛板材的回弹角约15°，在加温到 300℃以上可消除纯钛的回弹。钛合金板在500℃以上可消除回弹。钛管弯曲时应控制最小弯曲半径，详见表 7.5-50。

表 7.5-50 钛管弯曲时应满足的最小弯曲半径（S 为管子壁厚）

管子外径 D	最小弯曲半径 r
$D \leq 10S$	$1.2D$
$D \leq 25S$	$2D$
$D \leq 50S$	$2.75D$
$D \leq 60S$	$3.2D$

一般小管可采用冷弯，然后进行消除应力退火。大管和厚壁管需进行热弯，加热时必须保持微氧化气氛。加热时间不宜过长，防止吸氢和氧化。加热到 200～350℃，可使 $\sigma_{0.2}$ 降低 25%～50%，δ 和 ψ 略有提高，回弹可减少。对壁厚较薄而弯曲半径小的钛管弯曲时，可采取灌砂法弯曲，预防管子被压扁或起皱。

用钛板制作圆筒、半圆筒、锥体等零部件时，常在卷板机上进行弯曲。弯曲前将边部预先成形。为了使弯曲板材表面产生的变形量≤2%～2.5%，在板厚与筒体直径之比 $R=0.5S/\delta$ 时，筒体的直径应不小于（50～40）S。当筒体的直径小于上述值之时，钛板弯曲后要进行热处理，以消除应力，若钛板较厚，卷板曲率半径（r/s）较小且板材上有焊缝时，宜进行热弯。

2）冲压成形 钛冲压成形有三种：冷冲压、热冲压和预成形之后热校形。

① 冷冲压 在常温下冷冲压工艺简单，可避免气体污染，但由于钛屈强比高，回弹大，只适于壁薄、变形量小、弯曲半径大、尺寸精度要求不高的工件。

由于钛的缺陷敏感性高，冲压坯料的表面质量必须好，以免产生冲压裂纹。冷成形后，为消除残余应力可进行最终退火。当变形量大需要进行分段冲压时，应进行中间退火。钛及钛合金常用退火规范见表 7.5-51。

表 7.5-51 钛及钛合金退火规范

钛材牌号	工序间退火		消除应力最终退火	
	加热温度/℃	保温时间/min	加热温度/℃	保温时间/min
TA2、TA3	550～600	10～30	500～650	15～60
TC4	750～800	10～30	550～650	30～140

② 热成形 形状复杂、变形量大的厚壁工件或强度较高的钛合金工件，宜热成形。成形温度取决于钛合金的相变点。它应低于 β 转变点，控制在 α + β 两相区。温度过高，气体污染和晶粒长大情况严重，会使产品的性能下降。纯钛可在 200～250℃下成形，变形量一次可达 40%。对尺寸精度要求高的钛合金厚壁件，可在 500～800℃下成形。

热成形之后钛工件要进行喷砂、酸洗等表面处理，消除氧化皮和污染层。

③ 预成形后热校形　在回弹量很大，一次冲压难以达到所需形状和尺寸的情况下，可先用常规成形方法制作预成形件，然后在专用机床（热压床）或装置上加热校形，以消除残余应力和回弹，使工件达到所需的形状和尺寸精度。

钛材冲压成形的模具材料有铬锰钼钢（5CrMnMo）、铬镍钨钢（Cr21Ni11W2.5）、45号钢等。常用的成形润滑剂有：

① 以液态矿物油为基，加入40%胶状石墨。

② 以调油为基，加入25%石墨，10%～25%二硫化钼，4%～5%云母。

③ 20%铅粉，30%石墨，45%炮用油脂，5%二硫化钼。

④ 过氯乙烯清漆（只用于冷冲压成形）。

(3) 胀管

胀管是将管与管板严密结合起来的操作，是制造列管式热交换器的重要工序。

在制取全钛设备（列管式热交换器），即钛管与钛管板连接时，胀管属同种材料连接，接头强度很高。但在制造非全钛设备时，如钛－钢、钛－不锈钢复合设备时，胀管属异种材料连接，由于两种材料的膨胀系数相差几乎一倍，在高温下接头强度就减弱，这是应予注意的一个问题。

另外，由于钛对变形速率敏感性强，为避免胀管时发生裂纹，应以慢速进行。对钛管来说，液压胀管比机械胀管效果好，因为前者施力均匀，稳定，易控性好、效率高。实践表明，钛管与钛管板连接时，胀管度（内径扩大率 α）应为1%～1.6%为宜。胀管度以管壁减薄率表示时，可以达5%～10%。

对易于发生缝隙腐蚀的钛设备，管板不宜采用胀管法制备。如果一定要采用胀接，那么在胀接后应施加一道焊缝，密封胀接口。

(4) 焊接

钛设备通常是由许多钛部件通过各种接合技术组合而成的。钛的连接技术多种多样，见图7.5-17。其中焊接技术特别电弧焊接是最常用最重要的，这里简要介绍了该项应用技术。

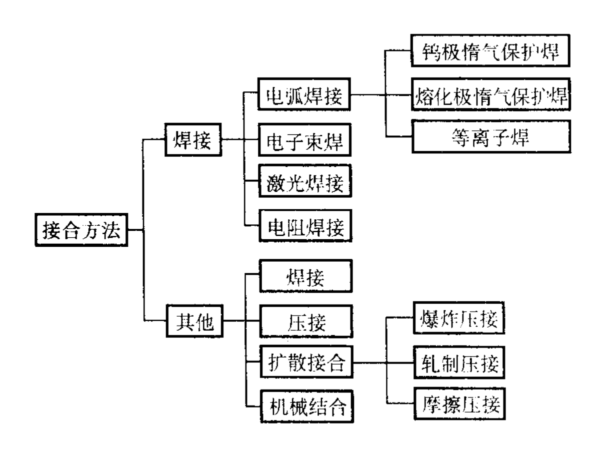


图7.5-17　钛的连接技术

钛的焊接特性与钛的许多基本性质相关：

① 钛熔点高（1 668℃）和高温活性强，在焊接或冷却过程中要隔绝空气，避免钛与氧、氮、氢作用。因此，为防止焊缝污染，钛必须在惰性气体或真空中进行焊接。同时，焊前严格清理焊件，彻底去除表面污物很重要。

② 钛的导热率低，与不锈钢差不多，约为铝的1/10，铜的1/20。因此，钛焊接时热量不易扩散。又由于钛存在固态相变，焊缝积聚的热量将导致焊缝邻近区过热。焊缝热影响区的温度达到β相变点时，晶粒迅速长大。因此，热影响区的综合性能较差。但钛焊缝区的强度与基体强度相当，这是钛的一大优势。在焊接时，制定严格的焊接规范很重要。在焊接薄件时，线能量的调节和散热措施特别重要。

钛及钛合金的焊接性能有较大差异。一般来说，纯钛及α钛合金（如TA7）的焊接性能最好。α－β钛合金（如TC4）次之，而β钛合金的焊接性能较差。随着β稳定元素含量的增加，焊接性能下降，因此，有些β钛合金不宜作焊件使用。

1) 钨电极惰性气体保护焊（TIG）　这种焊接设备简单，操作方便，广泛应用。

TIG焊接时，焊炬保护及辅助气体保护（后保护和背保护）要完全，以防氧化、氮化和吸气。理想的方法是在充满氩气的焊箱中进行焊接。但实际上，在大气中只要采用适当的工具和氩气，也能实施有效的保护。为获得优质焊缝，焊接熔池及400℃以上的热影响区都必须受到保护。保护气体可为氩气或氩与氦的混合气体。

TIG焊接有自动焊、半自动焊和手工焊三种形式。自动焊和半自动焊适于长焊缝、宽坡口和大批量生产；手工焊适于短小焊缝及单件生产。

TIG焊接采用直流正接方式（电极棒为负极）。钨电极靠近基材约3～5 mm处起弧，不能将焊炬里的钨电极与基材直接接触。

TIG焊接用的填充金属要干净。填充金属可以是专用焊丝或板材切割成的2～3 mm宽的方条。钛焊缝金属的化学成份应与基体金属相同或合金元素含量稍低，这是由于在焊接时焊缝会吸气增氧，填充焊缝金属应采用纯度稍高的钛材。

在空气中焊接时，由于有不同程度的氧化，焊缝表面会呈现不同的颜色，包括银白色、黄色、橙色、蓝色、紫色、灰色等，银色为最好，黄色、橙色和蓝色对于民用钛设备来说，也是合格的。

2) 熔化极惰气保护（MIG）焊接　它是用钛丝代替钨电极实现焊接的方法。焊接时，钛丝端部与基材间起弧，电弧热使钛丝和基材熔化。它采用直流反接式（焊材为正极）。MIG焊接的特点是焊接速度大，生产效率比TIG高。MIG焊接的最大优点是可避免钨极夹杂污染。但是，在电极熔化时，熔滴易飞溅而造成电流不稳定，保护气体紊乱，可能造成空气卷入而污染焊缝。因此，MIG焊接存在焊缝外观质量差和易产生气孔的问题。MIG主要用于钛中板与厚板的焊接。

3) 等离子焊（PA）　等离子焊接所用的焊枪结构、保护装置及焊接过程，与非熔化极电弧焊接（TIG）很相似。主要区别在于等离子焊接时，焊枪上的冷却喷咀对弧柱施加约束和聚束作用（热收缩效应），使弧柱温度升高，产生功率密度很高的等离子体。等离子弧能量集中，穿透力强，一次能焊透7 mm～8 mm厚（不开坡口）的板。因此，等离子焊具有焊接速度快、焊缝窄、焊接热影响区小，焊缝无钨污染，焊缝外观美等优点，它适于大型工件的焊接，也适于薄板的焊接。它是一种日益受到重视，应用愈来愈广的钛焊接方法。

4) 电子束焊（EB）　电子束焊是利用高电压下，热阴极发射电子经电子透镜聚焦后高速轰击被焊金属，使之熔化而实现焊接的方法。焊接通常在真空容器中进行。电子束焊接的输出功率可从1 kW到几百kW。真空度一般为 1.33×10^{-3} Pa（10^{-5} Torr）。

电子束焊的特点有三：第一是电子束斑小，焊接区窄，熔深大，焊缝深宽比大（可达20:1）。45 kW的电子束焊机一道可焊90 mm的钛板；第二是热影响区小，工件变形小；第三是在真空下可避免大气污染，焊缝总是呈银白色。对钛来说，电子束焊可说是最合适的一种焊接方式。

但是，电子束焊设备较昂贵，操作不大方便，工件尺寸受空间限制，生产成本较高。因此，在民用品生产中，电子

束焊并不常用，只有某些焊接性能差的钛合金采用电子束焊。

5）钛钢复合板的焊接 许多钛设备是钛钢复合板制成的。但钛与钢是异种材料，不能相互熔焊，必须分别进行钛与钛、钢与钢之间的焊接。通常是先进行基材（钢）的焊接，然后进行复材（钛）的焊接。

在焊接复层（钛）的时候，线能量不能太高，以防止基层（下层）的钢熔化。焊接时要采用合适的坡口，并在基材上开有小孔，可通保护气体（氩气），防止间隙处发生氧化。在焊接区以外的间隙，要用适当的材料密封，不使氩气从盖板的间隙中漏出。随着焊接的进行，顺次将密封材料剥离。

钛钢复合焊接构件在进行焊后热处理时，要充分考虑高温对钛的影响。热处理前，钛表面一定要充分洗净。热处理最好在氩气或真空中进行。大气中加热温度不宜超过650℃。

6）其他焊接方式 钎焊、摩擦焊、爆炸焊、扩散焊对钛来说，都是非熔化型焊，虽然应用面较窄，但都有其特色和适用范围。

钎焊主要用于钛与异种金属（不锈钢、铜、镍、铝等）材料的焊接。焊接的关键是选择合适的钎料，对钎料的要求是熔点低（低于钛的相变点），与基材的润湿性好，不产生脆性化合物，并有良好耐蚀性。钛钎料有 Ag 基、Al 基和钛基三大类。银基和铝基钎料，易制做和使用，但接头强度较低。钛基钎料的接头强度高，耐蚀性好，但钎料的加工性差，难以制成箔材使用。

摩擦焊是将接头两侧的部件压接在一起，然后通过工件的旋转，施以滑动摩擦，依靠摩擦热使部件升温，使接触面在短时间内扩散接合。

爆炸焊是制造钛与异种金属（如钢、不锈钢、镍、铜等）复合材或复合部件的方法。将炸药置于复材（钛）上，复材以一定角度置于基材（如钢）上方，雷管点火从一端起爆，爆炸产生的巨大冲击波使复材强力撞击基材，从撞击点产生的喷雾状和粒状金属射流，清除金属表面的污物（氧化皮等），并使金属面上的原子达到原子间引力的作用范围，实现瞬间接合。接合强度可以通过抗拉强度与抗剪强度来评定。爆炸结合对钛钢复合板的生产非常重要。它既用于直接生产钛钢复合板，也用来生产钛钢复合坯料，以便通过轧制，进一步加工成较薄的钛钢复合板。

扩散结合是在不被氧化的气氛中加热加压，使钛材相互接合的方法。扩散结合常与超塑成形结合在一起，因为许多钛合金的扩散结合温度与超塑成形温度相吻合。这种方法成本较高，生产效率较低，主要有于宇航高性能部件的生产。

（5）钛的切削加工

钛的切削加工性能属于中等偏难，与不锈钢相近。钛的切削加工性能与钛的基本物理、化学特性有关，存在下列难点。

① 由于钛导热率小，刀尖处产生的摩擦热几乎全部集中在刀刃和刀具的前倾面上，刀尖温度高，易磨损。

② 由于弹性模量小，深切削时工件易挠曲，加工时需安装防振架。

③ 由于回弹大和材料各向异性明显，会影响加工精度。

④ 由于高温化学活性强，加工时易产生表面污染。

⑤ 由于钛表面氧化层和吸气层硬度高，磨损刀具严重。

根据上述情况，钛切削加工应遵循下列基本原则：

① 采用低速加工。通常钛的切削速度应比相同硬度钢的切削速度低 25%～50%或更低。

② 采用大进刀量，主要是避免刀具与表面硬层摩擦。进刀量对温升影响很小。

③ 采用锋利刀具。刀具一旦变钝，必须立即更换。

④ 采用足够的切削液（润滑冷却液）。常用切削液有5%氯化钠溶液、5%～10%水溶性油的水溶液、乳化油、硫化油、机油等。

1）车削 钛的车削宜用高速钢或硬质合金刀具，应选用刚性好的机床和夹具。硬质合金中应不含有钛。使用硬质合金刀具时，切削速度一般为 30～55 m/min，干车时，宜用较低的车速，湿车时可用较高的车速。切削液可选用标准乳化液。

另外，在车削钛时一定要用活顶尖，不能用死顶尖。因为，钛与死顶尖相摩擦时会发热、黏结，造成顶针孔扩大、偏斜，影响加工精度。

2）刨削 钛的刨削比车削更困难一些，拖刀和吃刀时的冲击和振动易产生崩刀。刨刀材料最好选用 K30（YG8）硬质合金，对工业纯钛切削速度约为 12 m/min，如用高速钢刀具，切削软硬的钛合金，则刨削速度应降至 5 m/min 以下。

粗刨时，吃刀深度应小于 6 mm，横向走刀速度以 2 mm/道次为宜。精刨时，吃刀深度应降至 0.5～0.05 mm/min，横向走刀速度则可提高到 12～25 mm/道次。

3）铣削 钛及钛合金的铣削加工比车削加工更困难一些。铣削也应选用高速钢或硬质合金刀具，并应采用直径小、齿数多的铣刀进行顺铣，减少偏斜和振动、铣削液一般宜用易溶水的润滑冷却液，添加方式以喷雾状喷射为好。在采用硬质合金刀具铣削时，铣削速度可达 50 m/min；而用高速钢刀具时，铣削速度大约应降低 40%。

4）钻削 钛及钛合金钻削加工的钻头可用高速钢或硬质合金，并以采用 118°或 90°的双顶角为好，因为它可以切断切屑，使之易于排屑。如不及时排屑，将发生钻头被卡、断裂、黏结等情况。纯钛钻孔时的钻削速度可达 20～30 m/min，而钛合金的钻孔速度应小于 10 m/min。

（6）钛铸造成形

工业纯钛及常用钛合金均具有良好的铸造性能，如流动性好（与中碳钢相似），易于形成集中缩孔，不易产生疏松，热裂倾向小等，可以获得性能较好的铸件。但铸件的综合性能不如锻件，如塑性、疲劳强度要低一些。这是因为钛铸件的组织是较粗大的片状组织（魏氏组织），而锻件的组织通常为细小均匀的等轴组织或网篮状组织。钛铸件的致密性、组织和性能可以通过热等静压（HIP）、循环热处理得到改善，但这会使铸件的生产工艺复杂化，增加成本，因此除航空用的高性能钛铸件外，一般不采用这种后处理技术。

钛的铸件生产与钢、铝、铜等金属铸件的生产有很大不同，总的来说，钛铸件的生产技术要复杂一些。

钛是高熔点活性金属，在熔融状态下，钛不仅与各种气体发生反应，而且几乎与所有的耐火材料发生反应。所以，钛的熔化和铸造不仅必须在真空或惰性气体保护下进行，而且钛液必须盛在水冷铜坩埚中，对铸件的造型材料也提出很特殊的要求。

目前，铸钛的熔炼大部分采用真空自耗电极电弧凝壳炉（俗称真空凝壳炉或壳式炉）。近年来，带水冷铜坩埚的真空感应熔炼也在迅速发展。

壳式炉的结构如图 7.5-18 所示。我国壳式炉的最大熔化量为 500 kg，国外已达 2 000 kg 以上。自耗钛电极是做钛铸件用的原料。为减少熔炼时的放气和钛液中的气体含量，一般不直接采用海绵钛电极，而是用已经过一次熔炼的钛铸锭做电极。熔化时采用大电流快速熔化，熔炼时真空度为 1.33～0.0133 Pa（10^{-2}～10^{-4} Torr）。

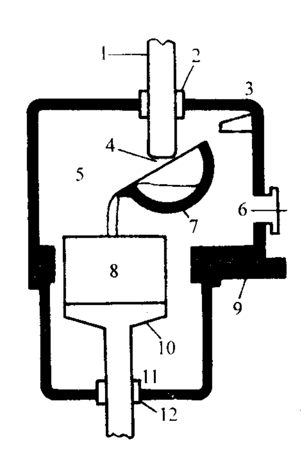


图7.5-18 壳式炉的结构示意图

1—自耗电极；2—密封；3—加料斗；4—电弧；
5—炉体；6—真空系统；7—坩埚；
8—铸型；9—闸板阀；10—升降心盘；
11—浇铸室；12—密封

熔化结束后，立即灭弧浇注，将坩埚中的钛液倾倒到铸型之中。通常采用离心铸造法。铸型位于转盘上，转速为200～500 r/min。

常用钛铸型材料有4种。

1）机加工石墨型 它用石墨电极做造型材料，石墨具有高温稳定性好，熔化温度高（约3 800℃），导热率高，热容量大，膨胀系数低，高温稳定性好，抗热冲击性能好等特点，钛液在石墨中结晶速度快，有利于细化铸件组织，获得较好的性能。石墨在钛浇注温度（高于1 800℃）时，与钛作用时间很短，只有微弱反应，对较厚壁的钛铸件质量不会有显著影响。

2）石墨粉捣实型 它是将石墨粉加黏结剂捣实、烘烤成型的铸型。具有制造成本低、退让性好、造型灵活性大、适应性广等特点，可像钢铁制造砂型一样制造形状复杂的铸型及难脱模的型芯。但铸型含气量较大，铸型强度较低，难于生产优质铸件。

3）金属型 它用碳钢或铸铁做铸模，在模腔内壁采用等离子喷涂法喷涂一层难熔金属（如钨或钼）粉末，防止钛液与金属模直接接触而起反应。这种模成本较高，但它强度高，可以重复使用，适于成批生产。

4）熔模铸型 这是制造精密钛铸件的方法，由于生产成本高，它只用于航空钛铸件、高尔夫球头的铸造生产。

钛铸件的技术要求应按GB/T6614－1994“钛及钛合金铸件”标准执行。

（7）粉末冶金

用海绵钛或钛残料（钛屑及边角废料）制成的钛粉可以用来生产钛零件，如钛阀门、套筒、阀座、法兰、泵体过滤元件等小型部件。制备钛粉的工艺通常为氢化脱氢工艺，即先将钛残料在500～700℃下氢化，形成脆性氢化物，使之易于破碎成粉。氢化钛粉中的含氢量一般控制在1.9%～2.0%（质量分数）。然后将氢化钛粉压制成形。压制压力为200～250 MPa，保压约3 min，第三步是脱氢与烧结，使氢化钛压坯变为致密钛制品。脱氢与烧结可在一个炉子内连续进行，也可以采用两炉子分开进行。脱氢是在真空和500～800℃下进行，脱氢需约2 h。脱氢完全（真空度回升）后进行烧结，即快速升温至1200℃，保温2 h，然后随炉冷却至120℃以下出炉。这样可获得银灰色的钛制品。

粉末冶金法制造钛汽车零件有很大优势，尤其是制造多元合金及复合材料或复杂零件时，细小、均匀的组织可保证优异的性能。

粉末冶金钛的另一类产品是多孔钛，它包括多孔钛片、多孔钛过滤管等。例如，大输液生产线中活性碳的回收使用（ϕ20～90）mm×（100～1 750）mm微孔钛过滤器，过滤精度：1～50 μm；外科心脏手术中氧合器使用（ϕ20～400）mm×（1.2～5）mm多孔钛片；电解臭氧发生器使用1 mm×60 mm×90 mm多孔钛板。

6 冶金工业用钛

6.1 钛在冶金工业中应用概况

在冶金生产中，设备常受到各种介质的腐蚀。钛的耐蚀性好，被广泛用来做冶炼加工过程的设备，如泵、阀、管道、槽、风机、电极、加热器等。表7.5-52示出了钛在冶金工业中应用的概况。下面将重点简要介绍钛在电解铜、镍、二氧化锰、湿法炼锌等行业中应用的情况。

表7.5-52 冶金工业用钛制设备

生产部门		使用的钛制化工设备
铜冶炼工业	铜冶炼	压煮器、透平充气氧化器、叶轮、搅拌器、湍动冷却塔
	铜电解	电解槽、电解液供应槽、泵、洗涤塔、阴极母板、阴极辊筒、换热器、过滤器、阀
	硫酸盐	真空蒸发装置、结晶器、换热器
	电解泥	搅拌器、槽、泵
铝冶炼工业	硫酸生产	洗涤塔、水淋冷却器、湿电滤器、风机、浸出离子交换柱、吸尘器、储酸槽、隔离箱、泵、阀
	冰晶石	输送硫酸的泵、槽
	氧化铝	硫酸阀，电解工序废气净化系统的液滴捕集器、风机
	铝生产	过滤器、泵、阀
锌冶炼工业		浸出设备：储液槽、泵、浓缩机、空气搅拌浸出槽、风机、真空过滤器；沸腾焙烧炉的气体输送和净化设备：除尘器、电滤器、风机；电解设备：电解锌阴极、电解槽、容器、蛇管加热器、电晕、电极；硫酸生产设备：洗涤塔、电除雾器、储液槽、管道泵
铅冶炼工业		风机、节流阀、湿式收尘器部件
锑冶炼工业		电除尘器、泵、洗涤塔部件、除尘器中的电极
镁冶炼工业		高钛渣氯化和钛镁生产烟气净化设备：风机、阀门、捕集器、泵、管件、洗涤塔、循环槽；碳酸钠净化器设备：洗涤塔、捕集器、烟筒
镍冶炼工业		过滤设备、高压釜、换热器、蒸发器、反应器、槽、萃取器、泵、阀、风机、阴极母板
钴冶炼工业		风机、泵、阴极母板
汞冶炼工业		冷凝器
钨冶炼工业		钨酸生产蒸发锅、离心除尘风机、搅拌机的鼓泡管轴
钼冶炼工业		反应器、干燥机、过滤器、离心机、风机、料槽、高压釜

续表 7.5-52

生产部门		使用的钛制化工设备
锆冶炼工业		二氧化锆和氯化锆生产中的真空过滤器箱、浓缩机的搅拌器、泵、风机、硫酸的漏嘴；锆冶炼中的反应器、萃取器、除尘器、氯化物装料箱、冷凝器、槽、管状过滤器；废气净化中的阀门、风机、管件、精馏塔釜的加热器；酸洗工序中的冷凝器储槽、洗涤塔、泵、通风设备
稀土冶炼工业		冶炼厂的萃取器、反应器、吸滤器、电极棒、泵、阀
贵金属冶炼工业	黄金加工	阴极、真空泵、萃取器、再萃取器、容器、风机
	硫酸和盐酸硫脲	树脂交换离子柱、离子交换装置换热器、浓缩槽、析出金的阴极、阀
	电解	阴极母板、泵、阀
	金刚石加工	黄金氰化浸出容器、再生离子交换树脂柱、反应槽
	其他	贵金属二次生产的反应槽、真空泵、离心机、风机、蒸发盘、容器、冲击洗涤器；金精矿氯化焙烧冲击洗涤器喷头、湿式静电收尘器阴极、离心机、风机叶轮
半导体工业		生产镓的风机、水解槽、离子交换柱、还原装置、精馏装置。生产硅和锗的螺旋水滴捕集器、水封槽、洗涤塔 生产砷的洗涤塔、风机 污水处理和消毒用接受容器、处理容器、压滤机、切线混料筒
有色金属加工工业		酸洗设备、净化装置、废酸、废液处理装置、电解槽、电解液加热器、废乳剂容器、离心机、风机、泵、阀
钢铁工业		炼铁高炉炉体周围的冷却装置，如风口、稳定冷却器、热阀冷却器、热电偶套管 轧钢厂酸洗工序的酸洗槽、泵、风、机、阀、镀槽、喷淋嘴 铁合金生产中的泵、阀、风机
炼焦工业		吸滤器、结晶器、泵、氨分凝器；收尘工序的饱和池、离心机、鼓泡器、循环池、中和池釜、吡啶碱冷凝器、脱酚洗涤塔蛇管、熄焦塔、除尘装置；喹啉、酚计量槽液面计导向导管

6.2 钛在电解铜生产中的应用

在电解铜生产中，阴极始极片很重要。过去一般用紫铜板或磷铜板做为制取始极片的阴极母板。铜母板的优点是电阻小，缺点是始极片剥离困难，隔离剂（皂基水）对电解液有污染；铜沉积不均，始极片成品率低；铜母板不耐腐蚀，寿命短（几个星期~3年）。工人劳动强度大。沈阳冶炼厂、云南冶炼厂、白银有色金属公司采用钛阴极母板取代铜母板，取得良好经济效益。云南冶炼厂用 TA2 钛（2.5 mm × 880 mm × 930 mm/重 10 kg）代替 3 mm × 880 mm × 930 mm/重 23.5 kg 的铜种板，成本降低 45% 以上。

电解铜生产中的电解液温度需靠加热器维持在 62~68℃ 之间。铜电解液的主成份为 $CuSO_4$ 溶液，浓度为 170~190 g/L，是一种强腐蚀性介质。加热器材料要经受内部 180~200℃的过热蒸汽和外部铜电解液的双面腐蚀。加热器的选材是一个关键。

所用加热器材料有铅、不锈钢、石墨、钛等。对比实验表明，铅加热器有价廉和热导性好的特点，但机械强度低，受压后易破裂，造成电解液对蒸汽系统的污染，并且铅加热器壁厚而笨重；不锈钢（1Cr18Ni9Ti）列管加热器的焊接区因合金元素（Ni、Cr、Ti）在晶界以碳化物形成析出而不耐蚀；石墨加热器因表面细孔易吸附介质，造成积垢和管道堵塞，并影响热交换效果。石墨加热器一般只能使用 7~8 月，就要酸洗清理一次，而多次酸洗又会造成粘结区的松脆、脱落，引起 $CuSO_4$ 的泄漏。

TA2 纯钛管耐蚀又高强，焊接性能也好，不结垢，是最佳的列管式加热器材料。在电解铜生产中，某厂使用 ϕ38 mm × 15 mm × 2 500 mm 钛管做的全钛外管加热器 18 台，每台加热器的换热面积为 50 m²，已连续使用 10 多年，从未检修过。钛加热器的一次性投资虽然大（约为其他设备的 3 倍），但使用寿命高 4~10 倍，长期使用效果好，已成为我国各铜冶炼企业优先选购的加热器设备。

表 7.5-53 为某厂的铜电解液加热器的使用效果对比。

表 7.5-53 钛与石墨加热器的经济效果对比

项目	钛加热器（9.6 m²）	石墨加热器（20 m²）
造价/万元	1.8	3.2
质量/kg	400	1 200
使用寿命/年	>7	1
年折旧费/元	2 571	32 000
电解铜蒸气单耗	1.0	12

表 7.5-53 说明，用钛作加热器，具有使用寿命长，生产稳定，消耗低的特点。

阴极辊筒是生产电解铜箔的设备，国内外曾使用过不锈钢辊筒，由于它们不耐电解液的腐蚀，在辊筒表面易出现点蚀，导致铜箔产生针孔或毛刺。

采用无缝钛阴极辊筒（旋压辊筒），可生产出质量优良的铜箔，铜箔厚度最小为 0.035 mm。质量可达到国际电工委员会 IEC 标准。电解铜箔的生产效率可提高 10%~15%。国内最大的空心阴极辊筒的尺寸为 ϕ1 500 mm × 15 mm × 1 500 mm。

6.3 钛在电解镍中的应用

某厂在镍电解中用钛板代替不锈钢板作为“阴板种板”，使镍始极片成张率由 60% 提高到 90%，并使大量低品位的三号镍升级为优质的一号镍，减少了母种板的消耗，8 个月就可以收回钛种板的投资，取得了良好的经济效益。在该厂镍生产中，还大量使用钛盘管加热器、钛泵和各种钛阀，钛阀的使用量达上千个，每年用钛取得的经济效益达数百万元。

6.4 钛在湿法炼锌中的应用

我国某厂在湿法炼锌时，经沸腾炉焙烧后的焙砂，温度高达 800℃，它连续进入浸出冲矿溜槽，在 pH = 1 的条件下进行酸性浸出。过去浸出冲矿溜槽采用不锈钢制造，由于矿浆的强烈磨损和热酸腐蚀，长达 80 m 的大型溜槽寿命很短，其中 3/4 段（60 m）寿命仅约 1 年，中间还要修补，其余的

1/4段（20 m）也只能使用2年。另外，用不锈钢管制造的输送矿浆的扬升器由于腐蚀和磨损，寿命也很短，18台直径200 mm，壁厚10 mm的扬升器，有8台的使用寿命只有4个月。生产过程中，设备频繁检修，严重干扰了生产，增加了生产成本。自1985年和1986年陆续改用钛管扬升器和一段钛冲矿溜槽后，设备长期安全运行，生产大为改观。

6.5 钛在电解二氧化锰生产中的应用

钛制波纹板可用于二氧化锰生产中的种板。钛波纹板不仅耐蚀性好，而且刚性好，它与同尺寸的平面钛种板相比，其有效工作面积增加17%，质量减小20%～40%，生产效率也较高。自1991年以来，我国某厂已向多个电解二氧化锰厂供应钛波纹种板，使用情况良好。

6.6 钛在钢材生产中的应用

抽风机是钢厂生产中必备的设备，有时会受到严重腐蚀。在某大型钢厂（鞍钢冷轧薄板厂）生产中，要利用酸洗除掉钢板表面的氧化物和油污。酸洗液为稀硫酸溶液，浓度为25～35 g/L，pH值1～3，温度为97～99℃。在酸洗过程中，需要4台大容量风机（24 000 m^3/h），排除酸雾和尾气。在上述工矿条件下，1Cr18Ni9Ti不锈钢风机因不耐蚀寿命很短，使用寿命平均不到1个月。该生产工序的4个工位每年共需消耗48台不锈钢风机，其设备费总计达60万元（1.25万元/台）。改用钛风机后，设备寿命大大延长，一台钛设备可用多年。虽然钛风机的价格比不锈钢风机的价格高4倍多（4.5万元/台），但一年内可节约设备费42万元，五年内可节约282万元。钛风机用于轧钢厂生产，不仅减少了设备维修，增加了有效生产时间，改善了车间的劳动条件，技术经济效益十分显著。

在另一钢厂的酸洗自动生产线上，采用TA9（Ti-0.2Pd）合金做酸枪和文丘里喉管，在废酸处理中采用TA9合金做管式换热器，均收到良好效果。换热器的工作介质是高温盐酸，工作温度为130～170℃，工作压力最高达6.8 MPa。换热器所用管材规格为ϕ16 mm×1.5 mm，每台换热器的换热面积为8 m^2，共用2台，运行情况良好。

6.7 钛在焦化生产中的应用

在焦炉生产焦碳时，会产生大量煤气，煤气中含有大量对环境有害、对设备有很强腐蚀作用的H_2S、NH_3、HCN。为此，煤气需要净化处理，同时回收有益成份，提取硫铵、硫磺等副产品，变废为宝。由于煤气的腐蚀性强，煤气净化装置的选材是一个很关键问题。例如，在收尘工序，不锈钢的腐蚀速率达到0.41 mm/a，无法使用。铸铁泵的使用寿命不到2个月、0.5年到1.5年。在同样工况下，钛的腐蚀率仅为不锈钢的几十分之一或更低。因此在焦化生产中的某些工序用钛是必要的。目前，煤气净化工艺主要有AS法（氨硫联合洗涤法）和HPF法（以氨为碱源的硫氨法）。AS法投资大，但效率高；HPF法投资少，但效率较低，二者各有长短。煤气净化主要设备国外大量采用钛材。我国在20世纪80年代开始熄焦塔捕尘装置上采用钛材，90年代引进了国外AS法煤气净化生产线、其中有钛制脱酸塔、钛制换热器等。1992年，在马鞍山钢铁公司投产的第1套国产化AS法煤气净化装置中，则大量使用钛设备，包括脱酸塔、蒸氨塔分离器、蒸氨塔和挥发塔的塔盘、板式换热器、阀门、管道、仪表和流量计等，使用效果很好。之后，武汉钢铁公司、包头钢铁公司、本溪钢铁公司等十几家单位陆续在AS法流程设备中采用钛设备。至今已安全运行十几年。近几年，为节约投资，有20余家钢铁公司已经或将要采用HPF工艺，其中使用的钛设备有氨分缩器、精馏塔塔盘、氨冷凝冷却器、熄焦扑尘器等。

焦化行业用钛的经济效益见表7.5-54。

表7.5-54 每套装置选用钛材前后经济效益对比

设备名称	泡罩塔盘	制脱酸塔	制氨分缩器	板式换热器
改进前成本/万元	玻璃钢制：20	玻璃钢制：150	A1/4台：72	316L/4台：30
改进前寿命/年	2	2.5	4	4
改进前使用期内维修费用/万元	50	40	20	20
改进后成本/万元	钛：80	钛：360	钛：160	钛：70
改进后寿命/年	20	20	20	20
改进后使用期内维修费用/万元	0.5	0	0	0
用钛材节约费用/万元	170	880	220	98

6.8 钛在阳极泥湿法处理中的应用

某厂采用湿法从铜电解阳极泥中回收金银。生产能力为日产阳极泥5 t，蒸硒渣约4 t。在生产中采用了钢衬钛搅拌反应槽（2 m^3）、钛盘管换热器、三足式离心机、金粉烘干箱、搅拌转运槽、钛离心机、液下泵、过滤网、银电解阴极板槽内压缩风管、压滤机进出口管，锁布夹等钛装置，取得良好效果。

6.9 钛在钼湿法冶金中的应用

钼的湿法冶金工艺为辉钼矿氧化脱硫后，进行盐酸除杂质处理，再用氨或碱，对除杂后的物料进行浸取，浸取后进一步除杂，用酸高速浸液而得钼酸铵产品或通过蒸发浓缩结晶，制得其他钼酸盐。传统工艺中，盐酸预处理设备用碳钢釜内衬橡胶的办法解决盐酸、硝酸混酸腐蚀问题。但由于橡胶易老化、受热后与碳钢的膨胀系数差异大，易鼓泡、开裂，橡胶衬也不抗撞击，不耐摩擦，因而寿命短，常造成停工停产。采用衬钛釜之后，设备使用寿命大大延长，经济效益非常好，见表7.5-55。

表7.5-55 钼湿法冶金中使用碳钢衬胶釜和碳钢衬钛釜的成本对比

名称	内衬厚度/mm	内衬价/元	釜体价/元	总价/元	使用期限/月	吨产品设备折旧费/元
碳钢衬胶釜	双层，每层3	6 400	10 600	17 000	11	18.50
碳钢衬钛釜	3	31 200	10 600	41 800	168	2.98

7 电子信息产业用钛

7.1 在太空望远镜中的应用

太空望远镜是人类认识宇宙的重要工具，1990年升空的美国的哈勃望远镜使人类能获取140亿光年宇宙深处的天文信息。20世纪90年代以来，我国也在建造空间大阳望远镜，并使用了钛做关键结构材料。

中国建造的空间太空望远镜是大型精密光学观测设备，

它的主要结构由卫星平台框架和主框架组成。主框架高4 m，直径大于1 m，呈圆筒形，其上装有主镜室、焦面仪器箱、及紫外线望远镜、H望远镜、导星镜、控制电器箱等部件。卫星平台是高1 m，底边长2 m的正方形框架，其中心部位被主框架下部占据，周围安装各种卫星服务系统，如姿态控制系统、能源系统、星上计算机、通讯系统、星箭分离器等。

空间太空望远镜的构架要保证望远镜的成像质量，必须具有很好的强度、刚度和热稳定性。它对结构材料有苛刻的要求：

① 能承受火箭“发射力学环境”的考验，包括高达10倍重力加速度以上的超重、强烈冲击和振动等。

② 能承受空间环境下的剧烈温差而不发生变形。在空间运行时，其朝阳面温度可高达几百摄氏度，而背阳面的温度可能低至-100℃。

③ 为了避免对卫星姿控系统的干扰，结构材料不能具有磁性。

④ 材料比强度高。因为飞行器的质量每减少1 kg，可使运载火箭质量减小500 kg，用高强材料可降低成本。

钛由于比强度高于铝合金，能承受大的超重，钛的弹性模量也大于铝，钛结构的自振频率能满足设计要求（弯曲自振频率大于15 Hz，扭转自振频率大于20 Hz，纵向自振频大于35 Hz）。钛合金无磁，不会干扰控制系统。钛合金有良好的高低温力学性能，在真空和失重状态下，能保证主体结构不变形；钛合金膨胀系数较小，结构的热稳定性较好。虽然碳纤维材料的膨胀系数更小，但碳纤维材料连接工艺复杂，连结孔在成形后不可变动，不利于仪器的调整，而且碳纤维材料若发生断裂，无任何前兆。为弥补钛膨胀上的不足，设计时在结构上采用低膨胀材料进行轴向长度补偿的办法，使望远镜避免失焦。同时设置“在轨调整结构”，进行横向微小转移调整，从而可以保证望远镜的光学成像质量。

7.2 钛在计算机中的应用

1）计算机硬盘 钛是新型的磁盘硬盘材料。

美国Timet公司从1998年开始批量制造钛硬盘。这种硬盘有5.25 in、3.5 in、2.5 in、1.8 in等多种规格。盘片表面涂有铁氧体磁性物质。同铝质硬盘相比，钛硬盘具有强度高，高速转动时稳定性好、噪声低的优点。美国Timet公司投资500万美元，专门成立Titanium X公司（TMS公司）进行这种硬盘的开发。1998年的世界盘片市场约4.5亿张，每年在以10%~15%的速度在增长。估计2002年已达7亿张。硬盘可用于台式计算机、企业服务器和便携式计算机。

最适宜做硬盘的钛合金是Ti-3Al-2.5V，它在退火条件下有良好延性，可冷轧加工。其耐热变形性大大优于铝合金，耐热性好意味着在高温下可快速沉积磁性薄膜。另外，钛合金的热膨胀系数小，不易产生硬盘的读写磁头与盘片间错位，导致偏差失真的问题。

典型钛硬盘的技术性能如下：盘直径95 mm；厚度0.635 mm或0.8 mm；表面硬度14 700 MPa（经过TiN处理），最高工作温度700℃，平面度<10 μm（将来争取<3 μm），粗糙度 R_a<0.8 nm（将来争取达<0.3 nm）。

2）笔记本电脑和手机外壳 台湾明基电通M777OGT手机采用钛做机身，配合黑屏反白冷光屏幕，质感颇佳。诺基亚推出的8910型高档手机也有钛做外壳，不仅轻巧而且非常雅致。

2001年美国苹果电脑公司推出了钛壳笔记本电脑。这台称为PowerBook G4的笔记本电脑是采用工业纯钛做外壳，这是世界上第一台钛外壳电脑。钛壳电脑又轻又薄，外形美观，电脑厚2.54 cm，重4.2 kg。钛壳经过氧化着色处理，可以为灰色、红色、紫色等不同时尚色彩，是一种高档次的电脑。

7.3 钛在扬声器中的应用

80年代初，国外一些公司开发出了钛箔扬声器振动膜，使扬声器的低音和高音响应特性得到很大改善。

扬声器振动膜要求材料具有密度小、弹性系数高、内阻尼大，耐腐蚀和柔软性好的特点。用纯钛（TA1）箔材（厚度小于50 μm）能很好地满足这些要求。对钛振动膜的表面进行适当处理（表面氧化、离子镀TiN、渗硼等）可改善膜的频率特性。例如，表面氧化处理使最高频响达15 kHz，离子镀TiN和渗硼可使它的最高频响提高到18~20 kHz，沉积金刚石和类金刚石膜则可以使最高频响提高到20 kHz以上。

7.4 钛在照相机中的应用

钛是制造超高速照相机的重要材料。日本某公司用纯钛箔材做SP和F型照相机焦平面帘幕式快门。钛箔厚度为25 μm，将中间压成凹凸形状，以便保持其刚度和防止擦伤。然后对它进行特殊的表面加工处理，使之呈黑色，失去金属光泽，变成厚度仅5 μm的幕帘。这种快门的惯性小，动作速度快，快门声音小，即使在剧场使用，也能得到很好的效果。在尼康FM2型照相机上，纵行快门采用钛蜂窝状结构，快门速度达到1/4 000 s，帘速达3.6 m/ms。

某些高级特殊的照相机机体也使用钛材。例如，在高寒地区、极地探险用的照相机，就需要使用钛壳体。在严寒条件下，由于钛的低温韧性好，热膨胀率低，它对温度变化适应性强，耐振动和冲击，即使不经心使用，也不易变形。这种钛壳相机很受专业摄影师的欢迎。

另外，针对海中摄影，开发出了16 mm钛壳照相机。在海水摄影时，铝壳、不锈钢壳照相机都存在耐蚀性问题，用后需要仔细清洗。同时，在深水中，铝的耐压能力低，需要采用厚壁壳体；不锈钢壳体质量大，需要采取增加浮力措施，只有轻而耐蚀的钛做水下照相机壳体最合适。它便于实现相机的小型化、轻量化，使相机的水下操作性能最佳。Alifex相机就是一种钛壳水下摄相机。

日本美能达公司用纯钛做照相机的上下盖、前后盖及镜头盖，生产出了质量仅185 g的超小型高级照相壳。该照相机尺寸仅为99 mm×59 mm×29.5 mm。

两家日本相机公司使用的纯钛均为JIS2类工业纯钛。质轻高强的钛材使日本的相机日益小型化、精密化。

7.5 6N高纯钛在芯片中的应用

日本一家公司开发出了纯度为6N（99.999 9%）的高纯钛，它用于制造半导体芯片基板上氮化钛薄膜。使用这种高纯钛制造的薄膜，可以避免因杂质而产生的故障。此外，这种高纯钛还可用来制造多种工业用的高精度零部件。

7.6 电视荫罩生产

电视荫罩需要在酸性介质（$FeCl_3$）中加工处理。加工设备称为荫罩腐蚀机。

荫罩腐蚀机列由7台腐蚀槽组成，槽体长5 m，宽1.1 m，高1.6 m，用2 mm厚钛板加工而成，管道部分有许多钛异形结构，如变径分流管、异径三通管、Z型管、Π型管等。国产腐蚀槽于1996年在南京电子网板厂投产，使用效果良好。

7.7 钛在3C产品中的应用（计算机、通讯器材、消费性家电）

壳体是3C产品硬件的重要组成部分。看来，用钛取代塑料和铝、镁合金做了C电子产品的壳体，是促进3C产品高档化，实现3C产品升级换代的重要技术途径。在国际上，

3C产品的钛壳体正在形成规模化市场。CD机因体积小、使用方便而颇受年轻一代的喜爱。而日本一种爱华AM－HX200“迷你CD机”，它首次采用了全钛壳体，比原来的CD机还小1/3。由于钛的导热率比铝小，银灰色的外壳手感柔和，质感重厚，且轻巧坚固而不易划伤。壳体用日本JIS1类纯钛冲压而成，其尺寸为72.2 mm×78.8 mm×13.7 mm。钛壳厚度顶部为0.8 mm，底部为0.6 mm，质量仅84 g。该CD机价格为3.4万日元。

8　建筑与交通用钛

8.1　钛在建筑中的应用

8.1.1　钛在建筑中的适用性

钛是一种新型的金属建筑材料，钛在建筑上适用性主要表现在：

1）钛的比强度高，有利于结构轻量化，做屋顶特别合适。

2）钛有良好耐蚀性。钛材表面一层厚度不超过10 nm的氧化膜十分稳定，使钛能抗雨水、酸雨、污染大气、海洋大气等环境的腐蚀。

3）钛呈特殊的银白色，钛材的反射率较小，其自然色泽赏心悦目，经过适当的表面处理（阳极氧化、离子镀）之后，它可以改变色调，呈现各种美丽的时尚色彩，满足不同环境、不同建筑物的装饰要求。

4）钛建材经久耐用，不需要做涂层处理，耐低温，也耐高温，不会老化变脆。

5）钛无毒，对施工者与环境不产生有害影响，不会发生腐蚀物析出有毒金属离子污染环境的问题。钛材可100%回收利用。钛建材是一种“绿色建筑材料”。

6）钛的热膨胀系数是不锈钢的50%，Al材的30%，与玻璃、混凝土、砖和石头较接近，低的膨胀系数使数十米长的屋顶不需要预留膨胀缝。另外，钛的导热率低，只有Al的1/10，有利于建筑物的保温节能。

7）钛材有较好的施工性能。

纯钛易加工成薄板，可用标准的方法加工、成形和连接。钛材通常用TIG焊接工艺进行组件连接，焊接接头也具有良好耐蚀性，钛材可以进行蚀刻、压花、施压、喷砂、电镀和打孔等二次加工，以满足客户对装饰效果的需求。

钛在建筑上推广应用的障碍主要在于成本较高，目前钛主要用于对装饰效果有特殊要求的高档建筑、纪念性和标志性建筑。

8.1.2　建筑用钛的进展

钛被誉称为正在崛起中的“第三金属”，它是体现科技进步的年轻金属。钛应用在广场、公园、车站、机场、大厦等标志性和纪念性高档建筑，可以增加城市景观点，美化城市，优化居住环境，提升城市文化品位。

钛呈特殊的银灰色。这种颜色比铝和不锈钢的颜色温和，让人易产生一种想触摸的感觉。这种颜色可衬托周围环境，突出天空的蓝色和森林的绿色。通过阳极氧化和离子镀等表面处理，可以形成40多种颜色。因此，它在雕塑、建筑领域有良好的前景。

世界上第一个用钛制造的钛建筑物是俄罗斯宇航员加加林塑像与宇宙飞船Vostok发射纪念碑，它耸立在莫斯科。钛在民用建筑中的应用始于1973年，迄今有30年的历史，日本最早将钛应用于民用建筑，用做日本大分县的早吸日女神社的金黄色屋顶。现在，日本每年建筑用钛量已达数百吨，建筑用钛技术日臻成熟。钛建筑已遍布日本各地。

在我国，已先后建成了“海豚与人”（北京）、“乾坤球”（邢台）、“雄鸡报晓”（宝鸡）等3个大型雕塑，其中最大用钛量达2 t。正在北京建设的国家大剧院将是世界著名的大型标志性钛建筑（图7.5-19），这个钛建筑用钛量达30 000 m²，用钛60多吨，采用了日本的钛技术。现在，美国、加拿大、英国、法国、德国、比利时，新加坡、秘鲁、埃及等许多国家都有了钛建筑，可以预计，在21世纪，钛建筑将遍布全世界。

钛建筑的类型有许多，主要有庙宇、体育馆、博物馆、展览馆、影剧院、银行大楼、机场、电视塔、奥运火炬塔、钛雕塑、纪念碑等。在这些建筑中，钛主要是用做外观装饰性材料，如幕墙、屋顶、土檐等，也有用做栏杆、管道、桥梁包覆材料的，所使用的钛材基本为纯钛板材，板厚约0.2～1.0 mm不等。表7.5-56和表7.5-57分别示出了钛在屋顶和幕墙中典型应用的情况。日本福冈运动场是最大的钛建筑。

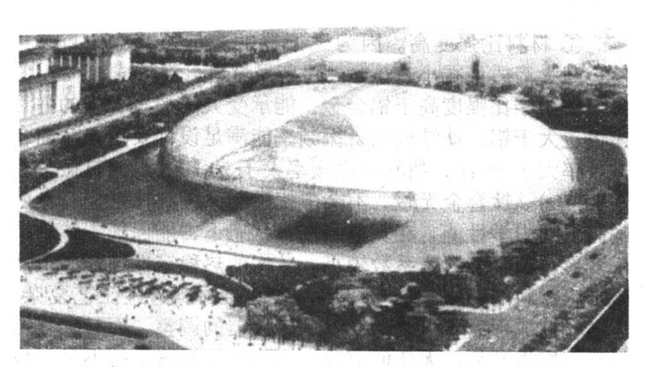


图7.5-19　大型钛建筑－北京的国家大剧院

表7.5-56　屋顶用钛情况

建筑物	时间	钛材	施工面积/m²	用钛量/t
日本早吸女神社	1973	金黄色	540	0.4
日本东京电力馆	1984	金黄色，0.3 mm	720	
日本神户须磨海滨水族馆	1987		2 500	12
日本新泻水族馆				4.95
日本水户艺术馆			1 113	40
日本三重县儿童福利院			1 026	25
日本川崎市民美术馆			3 500	21
日本静岗世界真光明教神殿		金黄色	35 000	90
日本福冈体育馆		灰色，0.3 mm	485 000	100
荷兰阿姆斯特凡高博物馆				43
香港MRTC中央车站		0.4 mm	6 500	

表7.5-57　幕墙用钛情况

建筑物名称	施工面积/m²	用钛量/t
日本龟田武道县大楼	190	
日本大阪三荣金属大楼	1 250	5
日本冲绳悬人寿保险大楼	2 500	10.4

续表 7.5-57

建筑物名称	施工面积/m^2	用钛量/t
日本东京养命酒本部大楼	2 540	30
日本水户艺术馆象征塔	2 500	25
日本手冢治虫纪念馆	173	4.1
日本大岛支厅厅舍	200	6
日本 JR 尼崎再开发公司	175	1.5
日本县立郡天文台	340	3.9
西班牙古根海姆博物馆	32 000	
荷兰梵高博物馆		2
荷兰 Scheepvaart 博士馆	4 600	
苏格兰国家科学中心	9 500	
美国 CITGO 公司中央调度室	340	
美国加州影城公寓	170	
新加坡海滨旅馆	420	

建筑用钛实例——日本福冈运动场钛屋顶。

日本福冈的运动场是投资600亿日元的现代化运动场，采用开闭式钛屋。馆顶分三大片，一片是固定的，另两片为活动扇形，由移动台车控制，可开可闭。圆馆顶直径达220 m。整个屋顶是用厚0.3 mm、宽260 mm、长4 000 mm的约5万张钛板贴合而成的。共用钛材120 t。

福冈体育馆采用钛而不用不锈钢做馆顶材料的重要原因是材料腐蚀与长远维修问题。福冈运动场是近海建筑，总面积近50 000 m^2 的大屋顶，一旦被腐蚀，维修更换工作非常艰巨，因此决定采用耐蚀性好的钛材。

钛材屋顶需要采用特殊的连接工艺。为了降低成本，施工人员对不锈钢屋顶的传统连接工艺进行了改进。将钛板材在长度方向组合，将接触部分折弯成二层、三层进行连接而不需要焊接，这样就降低了建筑成本，使钛屋顶的总成本几乎接近不锈钢焊接工艺。另外，为使屋顶能承受台风的袭击，采用了缩小搭接间隙等措施。这座位于博多湾附近的体育馆，可容纳4万人，除进行棒球比赛外，还可举办足球比赛、音乐演唱会、展览会等多种活动，它的5～6层有观看棒球赛的单人间，4层配有可供1 000人同时用餐的饭厅，可边用餐边观比赛，别有情趣。该场馆于1993年投入使用。

8.2 汽车工业用钛

当前，降低燃油消耗、减少有害废弃物（CO_2、NO_x 等）排放成为汽车行业技术进步的主要动力和方向之一。研究表明，轻量化是实现节油、减污的有效措施。轿车每降低10%的车重，燃料消耗节省8%～10%，废气排放量可减少10%。为此，世界各国都在研究汽车轻量化问题。汽车轻量化首选的途径就是用高比强的轻质材料替代传统的汽车材料。

钛具有质轻而高强，耐热又耐蚀的特点。钛与高强钢、铝、镁一道被用做实现汽车轻量化的四大金属材料之一。钛应用于汽车，可起到减重、节能、减振、降噪、减污、延寿、提高汽车安全性和舒适度的综合作用。

钛在汽车上的应用起始于20世纪50年代中期，即钛工业刚诞生不久的时候。但由于技术与价格方面的原因，钛在汽车上的应用一直没有引起产业界的重视，只是由于汽车节能与环保标准的提高，近年才逐渐成为国际材料界与汽车界共同关注的热门话题。

美、日、德、法、英、意、俄等发达国家都在研究汽车用钛问题。美国的PNGV计划（发展先进汽车计划）将钛列入汽车轻量化的重要材料，非常引人注目。2003年在德国召开的第10届国际钛会上，人们广泛讨论了汽车用钛问题，并首次举办了汽车用钛专题讨论会。2003年8月，中国首次主办了《钛金属与汽车工业技术研讨会》，汽车用钛已成为不可阻挡的发展趋势。

8.2.1 钛在汽车上的适用性和重要性

钛的许多优良物理、化学、力学特性使其非常适于做汽车结构材料。

1）密度低（4.5 g/cm^3），比钢约轻40%，而强度相当于或高于常用汽车钢。在各种金属材料中，它的比强度最高，等截面替换钢件，可使承力构件（阀座、支架、曲轴、摇臂、紧固件等）显著减重。对于高速运动部件，它可减小运动惯量，故适于做汽车发动机的气门活塞和连杆之类部件。

2）钛的耐热性好，可在200～650℃下长时工作，并且其导热性低，线胀系数小，故适于做气门之类高温部件。

3）钛耐蚀性远高于钢、铝、镁，甚至优于不锈钢，它抗大气、雨水、防冻路面（酒盐路面）湿气和含硫化氢高温废气的腐蚀，适于做工况环境较恶劣的汽车部件（如尾喷管）。

4）钛的弹性模量仅为钢之半，弹性好、疲劳强度高，适于做汽车弹簧材料。

5）钛抗冻性好，即使在零下100℃的环境中也不会产生低温脆性。

6）钛焊接接头的强度和耐蚀性非常好，可靠性高。

7）钛有较好的成形性，可通过冷冲压、热锻、粉末冶金、精密铸造等方法制取各种形状的汽车部件。

8）钛具有良好的装饰性，通过形成不同厚度的表面氧化膜，可获得各种时尚的色彩，美化汽车。

另外应指出的是，钛资源丰富，它在地壳中的含量仅次于铁、铝、镁；经过50多年的发展，世界钛工业已有相当的规模，具有向汽车行业等非航空部门提供多样化、大批量钛产品的能力。钛并非一种买不到，用不起，遥不可及的稀有材料。

诚然，同其他任何材料一样，钛也有它的缺点。一是它熔点高，活性强，冶炼、加工较困难，生产成本较高；二是它的某些工艺性能不如钢、铝、镁，如机械加工性能、焊接性能等，钛焊接要采用氩弧焊、电子束焊等特殊焊接方法，冷热成形需较高的成形压力。但实践表明，只要设计师、工艺师能扬长避短，合理使用钛材，钛在汽车上是可以大有作为的。

据国外权威机构的技术经济分析，在目前的钛材价格下，在轿车上大约有20种零部件适于用钛及钛合金制造。目前钛材主要用于汽车的某些关键部位：①发动机系统——阀门、阀簧及其承座、连杆、曲轴、变速箱等；②底盘系统——弹簧、消音器、排气装置等；③各种半轴、紧固件等。

如果钛成本下降，将有更多的汽车部件适于用钛。图7.5-20示出了汽车车体及其他部件适于用钛的零部件。

发动机是汽车的心脏。在发动机的关键部位使用钛材，可以获得“四两拨千斤”的作用，例如：

1）意大利的法拉利2003En20型超级汽车上的V12发动机，采用钛合金连杆后，机动性增强，助推速度在3.9秒内可达到62 kM/h的水平。

2）通用汽车公司在卡迪拉克16型汽车的V－16发动机（1 000马力）上使用钛配件和弹簧后，油耗可降到20英里/加仑的水平。

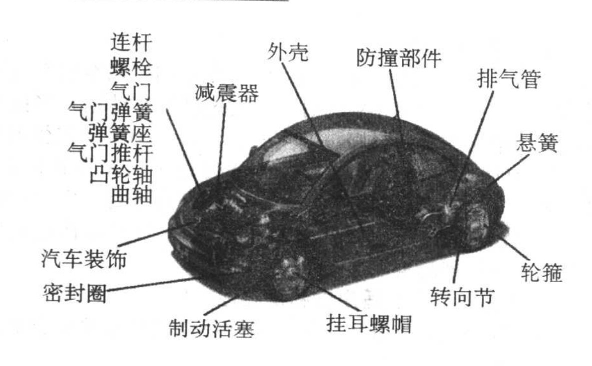


图 7.5-20　适于使用钛材的汽车部件

3）日本丰田汽车公司的 ALTE22A 发动机，在吸气和排气系统上分别用 3～8 个钛制气门，总质量仅为 408 g/台，与钢制气门的 667 g/台相比较，减重 40%。气门弹簧也由 43 g 减少到 36 g，减重 16%。该发动机的进气阀用 Ti－6Al－4V/TiB，排气阀用耐热钛合金 Ti－Al－Zr－Sn－Nb－Mo－Si/TiB，发动机的最高转速提高 500 r/min，高转速区的转动噪声降低 30%，凸轮驱动转矩降低 20%。

弹簧是汽车减震系统中一个较重的部件。试验表明，钛由于弹性好而强度高，它可使汽车弹簧减重 60%～70%。例如，德国大众汽车 2001 Lupo ESI 型汽车的弹簧比标准 Lupo 车型用弹簧减重 81.6 kg。由此可见，钛也可促进汽车整体减重。这种车已批量生产，初期为 3 500 辆/年。

美国通用汽车公司的 2 000 款雪佛莱 Cervette 206 汽车上，用一个仅 11.8 kg 重的钛消音器和尾气管系统代替原来重 20 kg 的不锈钢系统，减重达 41%。

除发动机外，在家用轿车上的驱动齿轮系统零件、悬挂系统和结构件，如减震缓冲器中心杆、挂耳螺帽和螺栓、控制杆紧固件、从动轴、车挡支架、门突人梁、制动器卡钳活塞、销轴栓等均适于用钛。

总之，钛在汽车上应用可带来减重、节能、降污、降噪、提速、增加机动性和舒适性的多重效益，是实现汽车升级换代的重要途径。

汽车用钛也会带来钛工业的发展与繁荣。目前世界每年生产近 6 000 万辆汽车，若每辆车上平均使用 1 kg 钛部件，则汽车用钛量将达到 60 000 多吨，相当于现有全球钛产量翻一番。到那时，汽车业就可能成为钛的第一大消费市场。

8.2.2　世界汽车用钛发展现状

1956 年，通用汽车公司（GM）展出了一台全钛车体小汽车。由此拉开了世界汽车用钛的序幕。

20 世纪 70 年代，赛车开始用钛并得以推广，主要为气门座。

20 世纪 90 年代，高级轿车开始用钛，以阀类、连杆为主，并对普通汽车用钛进行全面评估。试验车型包括各种轿车、运输卡车、轻型车等，零部件包括气门、气门座、连杆、曲轴和其他发动机部件、排气管、悬簧、消音器、各种紧固件、车体及框架等。

1994 年，本田汽车公司在 NSX 赛车的 3.0 L 24 阀 V－6 发动机中使用锻造钛连杆，成为钛材在汽车上批量化生产应用的先例；随后三菱汽车公司在其制造的高容量、四缸发动机中使用了钛气门弹簧承座；保时捷汽车中也使用了钛连杆。

1996 年，Timet 公司推出了纯钛制汽车排气系统并进行改良，现已通过评估。2000 年，GM 公司在 CorvetteZ06 汽车上，采用了 11.8 kg 钛消音器和尾气管系统替代原重 20 kg 的不锈钢系统，减重 41%。

2001 年，大众公司用钛制作新型 Lupo FSI 车用弹簧。Lupo FSI 为世界燃料费最低的汽车，已在欧洲市场进行销售。2001 年生产量为 3 500 台。另外在 LUPO GTi 车型中采用了钛制连杆。

1998 年，丰田 ALTEZZA 轿车的进气阀使用了采用粉末冶金法生产的 Ti－6Al－4V/TiB 合金，排气阀则采用了耐热 Ti－Al－Zr－Sn－Nb－Mo－Si/TiB 合金。该车型首先生产了 4 000台，其中一半使用了钛材。

在日本钛协会的推动下，日本先后开发了 SAT64AW，SAT64HM，SAT325HM，Ti－20V－4Al－1Sn，Ti－33.5Al－7Nb－0.5Cr－0.5Si 等汽车用钛合金。丰田公司的 Ti－MMC 气门已经成功批量生产和应用，主要用于大型汽车和部分中型汽车的钛消音器，技术已经非常成熟。STERAUCHI 等公司研制了 Ti－Al 金属间化合物和 50Ti－47.6Al－2.6Cr 合金汽车喷油嘴，该喷油嘴烧结后性能及尺寸精度都达到了使用要求。

从事汽车用钛的著名公司及汽车用钛的情况分别示于表 7.5-58、表 7.5-59。

在 863 项目资助下，西北有色金属研究院用粉末冶金法制出了钛汽车进排气阀座。合金成分为 Ti－4.5Al－Fe－6.8Mo（Ti12LC），其抗拉强度为 1 200 MPa，伸长率达 14%。成本比常规钛合金伐座降低 30%。西北有色金属研究院还建成了国内第一条汽车用低成本、高质量钛粉末生产线，年产氢化脱氢钛粉 30 t。宝鸡有色金属加工厂与日本某企业合作，正在开发汽车传动与减震部分用的钛材。北京航材院百慕航材高科技公司采用 1 600 t 曲柄压力机，锻制出了 Ti－6A1－4V 汽车连杆。总体来说，在我国汽车用钛还处于探索阶段，钛材研究、生产部门开始行动，汽车部门还未启动，同国外相比，有很大差距。

表 7.5-58　从事汽车及摩托车用钛研发的著名公司

国家	公司	研发活动
美国	通用汽车公司（GE）	开发卡迪拉克 16 型和柯维特用钛汽车
	克莱斯勒公司	排气系统用钛
	福特公司	开发 γ－TiAl 气阀
日本	本田汽车公司	开发发动机连杆用钛的 NSX V－6 赛车
	丰田汽车公司	开发用钛的 ALTE ZZA 轿车
	日产汽车公司	开发发动机用钛阀的汽车
	三菱汽车工业公司	开发发动机用钛的 GAZLANT 汽车
	铃木汽车公司	在 GSX－R1000 上使用钛消音器
	雅马哈摩托车公司	开发用钛的 YZF－R1 发动机
德国	大众汽车公司	开发用钛弹簧的 Lupo FSI 型汽车
意大利		开发用钛连杆超级汽车

表 7.5-59　汽车用钛的情况

车型	应用零件	原来材料	钛合金
Corvetle	排气系统	409SS	TIMETAL Exhaust Grade
VW Lupo	吊弹簧	Cr－Si 钢	TIMETAL LCB
Porsche GT3	连杆	Cr－Mo 钢	Ti－6Al－4V
Ferrari	连杆	Cr－Mo 钢	Ti－6Al－4V
A Ⅱ Audi，VW	密封圈	Al	TIMETAL 35A
A Ⅱ Mitsublishi 1.8L	阀弹簧固定器	钢	β钛合金

续表 7.5-59

车型	应用零件	原来材料	钛合金
Toyota Alteza	进气阀	300SS	Ti-6Al-4V
Toyota Alteza	进气阀	300SS	Ti-834+B
Infinity Q45	进气阀	300SS	Ti-6Al-4V
Infinity Q45	进气阀	300SS	Ti-834+B
Mercedes S Class	刹车延止器	SS	CP Grade 2
VW, Mercedes, BMW	界限毂螺杆	铝钢	Ti-6Al-4V
Yamaha. Suzuki, Kawasaki	消音器	409SS	TIMETAL Exhaust Grade

8.2.3 汽车用钛的几个关键问题

目前，对汽车行业来说，钛仍是一种高性能、高价格的陌生材料。从世界范围和长远来说，扩大钛在汽车上的应用主要是降低钛材生产成本，提高钛的性价比。同时，开发汽车用钛的新技术、新品种，更好地满足汽车及摩托车行业客户的需要。

我国有研发、生产钛材的企业约100家，有条件供应汽车用钛材或钛产品。我国汽车业正在以史无前例的速度高速发展，特别是家用轿车的需求量和生产量迅猛增长，预计2003年汽车产销量已超过400万辆。各种新车型不断涌现，为汽车用钛提供了良好机遇。

对我国来说，当务之急是要提高对汽车用钛必要性和重要性的认识，建立钛材研发、生产企业与汽车研发、生产企业的合作平台，寻找合作的切入点。

8.2.4 汽车用钛前景

美国、日本和欧洲均已制定了未来若干年汽车用钛的规划。

美国针对汽车轻量化制定并实施了PNGV（Partnership for a New Generation Of Vehicles）计划，对未来汽车提出了很高的要求，即燃料利用率比目前汽车要提高三倍，并具有更高的承载能力、维修性和再利用性。PNGV提出了明确的汽车减重目标（表7.5-60），即在未来的10~20年内，家用汽车减重40%。政府每年用于PNGV计划的资金超过1亿美元。钛材被作为实现PNGV中超轻汽车的发动机、底盘、车体候选材料之一。

表7.5-60 美国PNGV计划的汽车减重目标

系统分类	当代汽车质量/t	PNGV汽车目标质量/t	减重比例/%
车体	0.510	0.255	50
底盘	0.495	0.248	50
动力系统	0.391	0.351	10
燃料/其他	0.062	0.028	55
合计重	1.458	0.882	40

美国GM公司计划大量采用钛基复合材料Ti-MMC制造的汽车连杆。另外，大力推进钛基复合材料Ti-MMC在气门、活塞螺栓以及底盘上的应用；重型卡车用钛2002年进入性能测试和评估阶段；Howmet Corp.公司已经进行TiAl XD45合金铸造涡轮转子、涡轮增压器、发动机气门在家用轿车上的应用实验，预计2005年左右实现其在涡轮增压器上的应用。美国钛金属公司近期已宣布成立一个专门生产汽车用钛的分厂，称为Timet汽车厂。2002年的轿车、货车、摩托车用钛量达1100t，2005年的汽车用钛量可达5000t。

日本、欧州各国都在积极扩大钛在汽车上的应用。

中国是世界最大的潜在汽车市场。美国通用公司总裁预计，到2025年，中国汽车产量和本土销售量将会超过美国。世界各国的汽车厂商和各种新车正在进入中国。汽车零部件是全球采购件，钛制汽车件也不例外。中国正成为世界制造业中心，汽车零部件发展潜力也很大。因此，汽车用钛在中国大有可为。

21世纪的中国，不仅要做汽车生产与消费大国，还应做为汽车工业技术强国。只有汽车技术先进，汽车产品在国际上才有强大的竞争力。中国在与国外公司合作研发、生产汽车的过程中，也必然会遇到汽车用钛的问题。总之，汽车用钛势在必行，大有可为。我们应抓住历史机遇，实现汽车用钛技术的跨越式发展，为我国汽车工业与钛工业的繁荣做出贡献。

9 医疗、体育与日常生活用钛

随着经济的发展和人类文明的进步，人们对生活方式的多样性和生活质量的要求也日益提高。为此，轻质、高强、无害的金属钛也逐渐进入医疗、体育、日用品等与人的健康和生活方式密切相关的领域，在人们的日常生活中闪光。不久的将来，钛制品可能成为每个现代家庭中不可缺少的物品。虽然目前钛在生活领域应用的规模还不大，但发展潜力巨大，值得关注。

9.1 医疗用钛

钛在医疗上的应用，包括人体植入件、手术器械和康复器械上的应用。

钛在医疗上的适用性表现在以下几个方面：

1）钛密度低，使医用件轻巧，舒适感好。

2）钛有合适的强度和高的疲劳强度，可满足骨头、关节、手术器械和康复器械（如轮椅）的强度要求。

3）钛耐蚀（化学稳定性好），抗体液腐蚀，适于身体各部件使用。

4）生物相容性好，无毒性（无致炎、致癌作用）。

5）力学相容性好，钛合金的弹性模量可降至50~100 GPa，减少应力屏蔽，与人体骨头匹配性好。

6）低X射线吸收率，医检时，X光可视性好。

7）形状记忆功能，可用做脊柱矫形棒、骨钉、内固定器、聚髌器、内支架等应用。

8）超弹性，适于做矫形牙丝、缝合针等。

9）有良好加工成形性，适于制成板、棒、丝、管、毛细管、异形件等各种制品。

随着我国经济的发展和人民对生活质量要求的提高，要求肢体矫正、器官替换的人将迅速增加。钛在医疗上的应用将日益广泛。下面介绍一些典型应用。

（1）人体植入物用钛

钛及其合金的特点是它能在表面上自然形成一层薄薄的耐生理液腐蚀氧化膜。钛在生理液中的电离很小，它的腐蚀产物无毒，也不向体外扩散，而是集中在植入物附近。因此钛定义为“无毒金属”。

钛与不锈钢、有机玻璃、聚丙烯等材料相比，是一种综合性能极优的人工骨头和关节材料。人工骨头和关节用的钛材有纯钛和钛合金。第一代钛合金为Ti-6Al-4V合金，它是一种成熟的材料，但存在有毒元素钒（V）；其后又出现无钒的第二代医用钛材，如德国有Ti-5Al-2.5Fe合金、印度有Ti-5Al-1.5B合金，瑞士有Ti-6Al-7Nb合金，还有其他一些合金，如Ti-15Mo-5Zr-3Al、Ti-6Al-2Nb-1Ta等。Ti-6Al-7Nb得到国际医学界的青睐，1987年该合金纳入瑞士SNO56512标准，它已经在临床上大量应用。近几年

来，又出现了力学相容性更好的第三代医用材料，如 Ti-6Al-7Nb（TC20）、Ti-6Al-6Nb-1Ta 等低弹性模量的钛合金。钛合金做关节时，材料必须经过很好的表面氧化处理，以改善它与其他植入材料如聚氨酯的摩擦性能。

某些用于外科植入手术的钛合金和人骨的力学性能的对比示于表 7.5-61。

表 7.5-61　某些用于外科植入手术的钛合金和人骨的力学性能

材料	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	极限强度 /MPa	伸长率 /%	断面收缩率/%	疲劳强度 /MPa
Ti-6Al-4V	795	860	10	25	—
Ti-5Al-2.5Fe	830	920	14	—	580
Ti-5Al-1.5B	920	980	16	—	420
Ti-6Al-7Nb	1 130	1 000	13	—	—
Ti-15Mo-5Zr-3Al	250	—	—	—	620
人骨头		—	0.5	—	200

为了增加钛植入件与人体组织的结合牢度，防止钛骨松动，有时需要在钛表面形成一个多孔层。例如，用 200～500 μm的钛粉和锆粉混合与钛骨进行烧结。在钛骨表面形成孔径 200～250 μm 的表层。孔隙率 35%～45%时，3个月内，骨质可长达 3 000 μm，界面抗剪强度大于 4.6 MPa，获得内锁型生物镶嵌固定。

形成多孔层还可以用等离子喷镀方法。将氢化钛粉与 N_2 气（含 5%～15% H_2 的混合气体）一起等离子喷镀于 Ti 基材上，可形成孔径 50～120 μm 厚 0.8 mm 的 Ti 与 TiO_2 的混合层（过渡层），增强钛骨与周围组织的结合。

钛及其合金作为耐蚀材料和生物相容材料在医用方面已久负盛名。现在每年大约有数百万钛制髋关节用于病人身上。全世界，50亿人中每年因各种意外事故和因各种疾病需要更换关节的有 4 000 万～6 000 万人。我国是工伤事故率很高的国家，有大量人需要更换骨头与关节。

钛的力学性能与传统的牙科合金类似，但导热率较低，对牙髓有保护作用，价格也较便宜，因此被用作新型牙体材料。钛种植牙在国内外的临床应用中越来越广泛。澳大利亚悉尼大学研究人员制成了一种与众不同的假牙，即用钛做牙托材料，替代过去一直使用的钴铬合金材料。钛牙托它不仅质轻，韧性好，更能适应牙齿在牙床里的自然运动，也不会产生不良的生物反应。

表 7.5-62 示出了日本牙用钛的开发情况。

表 7.5-62　日本牙用钛的开发情况

用途	使用钛材	加工方法
人造牙根	纯钛、Ti-6Al-4VELI，Ti-Ni	锻造、铸造
牙齿矫形丝	Ti-Ni，β钛合金	拉丝
臼齿用齿冠桥	纯钛，钛合金	铸造
前牙用齿冠桥	纯钛，钛合金	铸造
牙床	Ti-6Al-4V，纯钛	变形、压印、铸造
牙托	Ti-Ni	铸造
颚骨植入件	纯钛	成形

钛也用于人工心脏辫膜、埋藏式心脏起搏器、冠状动脉手术、脑颅缺损修补等高难度、高风险医疗过程，挽救了许多生命。1988 年，西北有色金属研究院一位因汽车交通事昏迷 20 多天的受伤者，在脑颅手术中，用两块网状钛板修补左、右两侧的缺损脑颅，取得了非常好的效果，16 年过去了，患者虽已近 70 岁，现在仍很健康，它充分说明，钛对大脑是无害的，钛用于人体是非常安全的。

扩胸器是做胸腔手术时用来支撑胸膛的，一般用不锈钢制作，使用起来比较笨重，钛制扩胸器比不锈钢扩胸器轻 40%。钛扩胸器表面需经过抛光处理，提高耐磨性，防止表面挂垢和受杂质的污染，减少临床可能出现的交叉感染。俄罗斯一家工厂制造扩胸器已供医院用于临床。2001 年 7 月，美国一家医院（路易斯维尔犹太医院）成功地进行了钛制人工心脏植入手术。人造心脏形同柚子，其主体是以钛和塑料制成的泵，重约 1 kg，在电子装置的控制下，能根据身体需要自动调节泵的速度。美国有近 500 万心力衰竭症患者，且每年要增加 40 万例，其中需要心脏移植术者约有 2.5～10 万人。由于捐赠心脏器官者甚少，每年实施心脏移植手术者只有2 000～2 500人，钛人工心脏给此类患者带来福音。

TiNi 形状记忆合金在钛的医学用中占有非常重要的地位。TiNi 形状记忆合金具有奇特的记忆性能和超弹性，优良的耐蚀性与生物相容性，它在生物体内埋片腐蚀速率为 2.4×10^{-5} mm/a，Ni 离子的溶出极少，对生体无毒性作用，是一种较理想的生物功能材料。

TiNi 合金已获广泛的临床应用，主要在口腔科、骨科、心血管科、泌尿科、神经外科、肝胆外科、妇产科等方面。

在口腔科方面，TiNi 医用产品有牙齿矫形丝、颌面骨折锔钉、牙冠、种植牙体等。在骨科方面有脊柱矫形棒，颈椎人工关节、人工股骨头双杯、加压骑缝钉、聚髌器、人工髋关节、弧叉钉、弓形器、飞艇器等，它们用于患者的不同部位。

在心血管治疗方面，有记忆合金栓塞器、血管扩张内支架等。钛内支架还用于前外腺尿道扩张，治疗前列腺增生症。用于治疗气管狭窄、食道狭窄、恶性肿瘤造成的胆道狭窄等疾病，均收到良好效果。

我国在钛的医用方面取得了很大进展，TiNi 合金的医用处于国际先进水平。TiNi 矫形丝形成了批量生产能力，已向国外出口。

(2) 钛在手术器械中的应用

钛器械是继碳钢、不锈钢之后的第三代手术器械。不锈钢器械为改善防锈性能，常要经过镀铬、电抛光等表面处理。但铬有毒性，脱落的铬层会对人体造成一定影响。

钛做手术器的好处是：

1）器械轻巧，手术过程中可减少对血管、肌肉、器管的损伤，减少医生的疲劳，钛器械更适于做精细的显微外科手术；

2）耐蚀性好又无毒，设备不生锈，伤口不易感染，伤口愈合快；

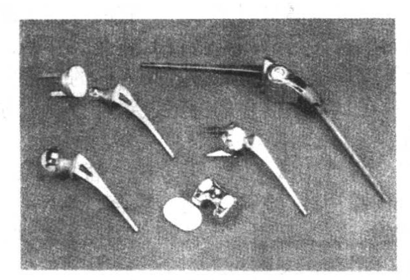
3）钛做钳子，镊子、显微手术刀等时，它的弹性适度；

4）在无影灯下操作时，钛的反光性能较弱，比不锈钢更合适。

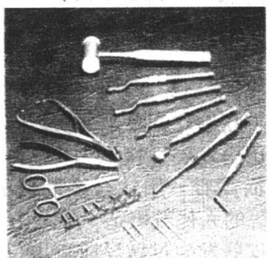
钛手术器械有手术刀、手术钳、手术镊子、胸腔扩大器、缝合针、缝合手术线等。缝合线一般用直径 0.5～0.8 mm 的纯钛丝（TA2 或 TA1 丝）。在妇女节育手术中，还成功地采用了 TiNi 超弹性丝，超弹性丝产生的柔和弹力，可促进伤口的快速愈合。典型钛医疗器件见图 7.5-21。

钛丝用做手术缝合线，与其他材料（如不锈钢线）相比，具有组织反应小和抗扭性能好的优点。缝合后，手术伤口不易发炎，骨缝合部位不易移位。俄罗斯用 BT1-00I 业

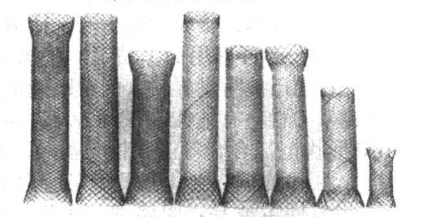
纯钛丝（ϕ1～0.2 mm）做缝合线。长度1 000 mm的缝合线，缠绕于木制线轴上，装于聚乙烯薄膜中。



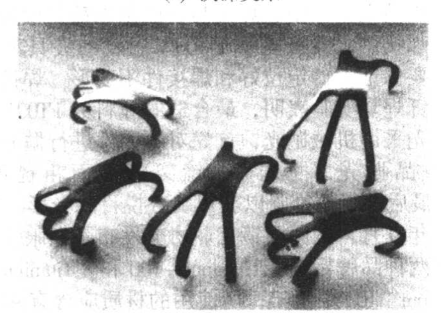
(a) 人工关节



(b) 医疗手术用具



(c) 钛镍支架



(d) 髌骨爪

图7.5-21　钛医疗器件

钛在辅助性医疗设备中也有许多应用，如用做氧气过滤器、氧合器、水过滤器、血液自动控温箱、超声粉碎机等。

1）空气净化器　氧化钛是空气净化器的理想触媒。与一段触媒不同的是，氧化钛可在室温下产生催化作用，不需要另外加热。美国北卡罗来纳大学的研究人员研制成一种用氧化钛作涂层的空气净化器，效果良好。这种净化器的核心部分为多孔陶瓷管子。当紫外线照射到这些陶瓷时，催化剂就会和氧起化学作用，消除空气中的污染物、可溶性物质、烟味等。

心脏手术时使用的氧气过滤器上采用钛微孔过滤片，效果良好。这种钛微孔过滤片是用粉末轧制法生产的。将粗、细两种钛粉轧制成双层复合微孔钛片，然后进行高温烧结。微孔钛片直径为42 mm，过滤精度为1 μm，过滤阻力小。目前许多医院都使用这种带钛过滤片的氧气过滤器。钛微孔过滤片技术是西北有色金属研究院开发出来的，已获得国家专利。

2）水过滤器　1992年，我国首次正式颁布了外科植入物钛合金加工材国家标准：GBB810－1992《外科植入物用TC4钛合金加工材》标准。这个标准是在参考了美国ASTM、英国BS和国际ISO标准等相关标准的基础上制定的。该标准达到了国际标准ISO5832/3《外科植入物—金属材料第三部分Ti－6Al－4V合金加工材》标准水平，是同国际先进标准接轨的医用钛材标准，为我国医用钛材的推广应用与国际商贸奠定了良好基础。

(3) 其他医疗卫生用钛

1）钛康复器材　有一种钛轮椅，质量仅8 kg，价格比钢椅贵，与铝合金椅相当（每台售价20万日元）。

2）钛在食品工业中的应用　钛可用于食用醋、非酒精饮料、食用胶、食盐生产中的钛泵、钛容器和输送装置，在果胶中，钛的溶解率为0.002 4 mm/a，在酒石酸中，钛的腐蚀率为0.003 4 mm/a，在普通盐中，钛腐蚀率为0.009 mm/a。钛在食品工业中应用是安全的。

3）钛在生态领域中的应用　钛可用于工矿企业的空气净化系统、污水处理系统、排换气系统和催化剂载体等。粉末冶金多孔钛材有重要应用。

4）钛丝手套　在食品工业中，特别是肉类制品工业中，卫生条件至关重要。在这种条件下，要求工人所用的手套既不污染食品，又灵活方便，经久耐用，不损害工人健康。它不宜使用普通的劳保手套，也不宜使用较重的不锈钢手套。瑞典某公司（Ergotlex）研制成一种钛丝手套。它较好地解决了这个问题。钛耐腐蚀对人体无毒无害，完全符合食品卫生法规要求；钛塑性良好，可拉成细丝，织成手套。钛丝手套仅为不锈钢手套质量的一半，也不产生皮肤过敏反应。

9.2　体育用钛

钛已成为一种新型的体育器械材料。钛在体育中的应用主要涉及高尔球、网球、羽毛球、赛车、赛艇、登山、滑雪、钓鱼、击剑等运动。

9.2.1　高尔夫球球头、球杆

高尔夫球运动有一项规则：限制球头质量而不限制球头的尺寸。打高尔球的人总希望用球头做大一点。钛的密度低，比强度高，因此用钛做球头可使球头更大一些。另外，钛的弹性模量小，弹性好，可使球头飞得更远。打击时，球与球头接触时间更长，使飞行更稳。广泛的对比试验表明，高尔夫球手用钛球头比用标准钢球头的击中率提高20%，而且击球距离也有所提高。高尔夫球用钛已成为民用钛市场的一个亮点，在高尔夫球运动在较发达的国家，已很广泛。1996年，高尔夫球的用钛量达到4 800 t。

高尔夫球头所用钛主要是TC4合金。日本钢管公司（NKK）研制的SP－700合金由于强度高和成形性好也开始用于高尔夫球。

钛制高尔夫球头的生产，可用铸造法和冲压－焊接法生产，但更多的采用精密铸造工艺，北京航空材料研究院的百慕公司已成为全球著名的高尔夫球头供应厂商。我国高尔夫球头的年产量已达约200万只，占全球产量的28%。

中国钛高尔夫球头照片见图7.5-22。

9.2.2　网球拍、羽毛球拍

早在1977年，钛网球拍就在市场上出售。钛网球拍与铝合金网球拍相比，有许多优点：击球面宽；耐久性好；打球的控制性好；钛强度高，可使框架构件较小，击球时空气阻力小，能减轻运动员的体力消耗和疲劳感觉；钛耐蚀性好，不会因汗水浸蚀而锈蚀。

钛网球拍结构与标准网球相同。它是将钛丝做成的网埋入球拍框内而成。一般采用纯钛做网拍，Ti－3Al－2.5V合金做长柄，也有人将钛镍超弹性合金用于网球的手柄。使用时，TiNi的表面要进行镀膜加工，使其更美观。

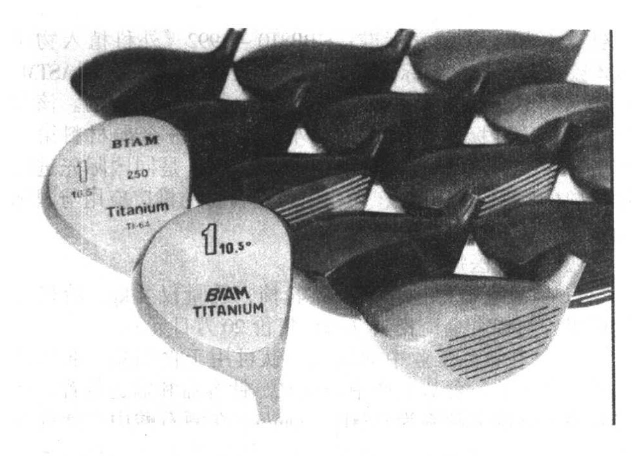


图 7.5-22 中国钛高尔夫球头照片

日本 Bridgestone 体育用品公司最近开发出了一种网球鞋。该种鞋的中央部分内藏钛合金楔形网架，它既可防止鞋底下沉，又可在脚踏地时起支撑作用，有利于增加运动员着地及起脚时的稳定性，增加鞋底抗扭曲的强度。

9.2.3 钛赛车

钛可用于比赛用自行车和汽车、摩托车。钛在汽车、摩托车上的应用已在前面介绍过，这里就不讨论了，只谈谈钛在自行车上的应用。

钛高比强又耐蚀不生锈，适于做轻便自行车。赛车减重，有利于运动员创造好成绩。

利用钛高比强的特点，可以改变自行车的设计。例如，一般自行车使用 36 根条幅，而钛自行车可仅用 24 根。美国一家著名公司（Litespeed）生产的钛自行车架比铬钼合金钢架还轻。质量仅约 1.5 kg，日本某公司生产的全钛自行车，质量是 5.9 kg。在车架上用钛时，因钛的弹性模量只有钢的 1/2，设计时要仔细考虑刚性。

在意大利，有专门生产钛自行车零件的公司，如 Campagnolo 公司，它可提供销钉、螺母、曲柄轴、前后轮毂轴、脚蹬轴等钛标准件。

钛自行车由于售价高，目前只适用于赛车运动及高档次的休闲健身运动，难于大量推广。

9.2.4 登山用具和滑雪板

登山用具特别需轻量化、小型化，易于携带。登山器材需要耐严寒，不冷脆。钛具有密度小，比强度高和耐低温（0～-60℃下保持良好韧性）的特点，是极优的登山用具材料，具有广泛应用的前景。

钛可以用来制造登山运动员的鞋钉、棍、杖、冰镐、紧固件等登山工具。日本用 SP-700 合金做运动员的登山工具。

滑雪运动与登山有许多相似之处，滑雪板、滑雪操纵杆也可用钛制造，并已商品化。

9.2.5 其他体育用品

2001 年，美国一家公司（Schutt Sports）生产出了橄榄球队用钛制防护面具头盔。该面具用涂复乙烯树脂的钛丝制成。与传统钢制面具相比，其质量减小一半，强度和耐久性等同或更优，但价格要贵几倍。Schutt 公司已生产出 12 种类型的钛制防护面具。钢面罩价格为 12 美元/个，钛面罩价格为 80 美元/个。

钛面罩比钢面罩减重 226 g。226 g 的减重听起来不多，但运动员的感觉变化很明显，使运动员的舒适感大为改善。2000 年，美国国家橄榄球联盟的球员首次使用这种面罩参加国际比赛。虽然钛面罩较贵，但预计它会在橄榄球运动中得到推广。

9.3 钛在日常生活中的应用

钛与铜、铁等金属材料不一样，它的应用不是从人们的日常生活开始的，而是从高科技的航空航天开始，然后进入化工、冶金等工业领域，最后进入到人们的日常生活领域。

目前，钛在日常生活中的应用大致可分五个方面：

1）眼镜架、手表用钛；
2）炊具、餐具用钛（锅、刀、勺、酒器等）；
3）办公用品用钛（笔、笔筒、墨合、手杖）；
4）装饰物、纪念品用钛（钛画、奖杯、奖牌、门牌）；
5）其他（手套、文胸）。

9.3.1 钛眼镜架和钛表

钛眼镜架和钛手表目前是最为流行、最贴近百姓生活的两种钛产品。

1）钛眼镜架 眼镜是大众化产品，眼镜架材料及加工技术，它随时代而不断发展，眼镜架材料已经与正在经历从铁→铜→镍→钛的历史发展过程。

钛眼镜架质轻而高雅。用钛合金制成的眼镜架质量仅 12 g 左右，使戴眼镜的人比较舒适。钛与人体汗液作用后不腐蚀，不会使人体皮肤发生过敏反应。1981 年日本福井公司首先开发出钛眼镜架。最初每副市销钛镜架价格高达几千元。现在，由于加工技术进步和大量生产，钛镜架成本已大大下降，成为一般人都可享用的消费品。中国从 1991 年开始生产钛眼镜，目前已成为世界最大的钛眼镜供应国。

制备钛眼镜架的材料有纯钛、Ti-12Zr、Ti-3Al-2.5V、β钛合金、TiNi 形状记忆合金等。眼镜架虽小，但制造工艺并不简单，技术性很强。一副金属眼镜架通常由 21～26 个零件组成，这些零件主要是：眼镜腿、边框、铰链、锁紧块、鼻托和螺钉等。

在钛眼镜架生产中，焊接与表面抛光都是很关键的工艺环节。在焊接中，要有能耐 1 100℃温度的夹具和合适的焊接填料，要保证工件定位好和焊接件不变形。焊接方法采用高频感应钎焊。实验表明，最合适的焊料为 FT001 和 FT2005 焊料。抛光采用机械抛光，首先对各零件进行抛光，然后对组装的成品抛光，抛光后，镜架的表面粗糙度可优于 0.2 μm，最后进行精饰，以获得赏心悦目的光彩。

1999 年 9 月，美国眼镜工业协会发布了钛眼镜架用材规范，规定两种品牌标记：Titanium-100 和 β Titanium-100。

Titanium-100 眼镜架，所使用的材质应含有 90%以上的钛，即 ASTM Gr1-4、Gr5～11、Gr16～18、Gr26～28 等。钛的用量必须占眼镜架总重的 90%以上，除了镜腿末稍，铰链螺钉、垫圈和鼻托以外，镜架主要应为钛制，而且镜架材料必须不含镍（镍会使有些人产生皮肤过敏反应）。

β Titanium-100：所用的材质应含有 70%以上的钛，即 ASTM Gr1～11，Gr16～19、Gr23～24、Gr26～29 等，镜架总质量的 70%以上必须是钛材，镜架材料必须不含镍。

眼镜架工业协会受理各生产厂家的注册，生产厂家要把镜架测试报告（对边圈、腿、桥、腿末稍）的分析报告报眼镜架工业协会。

2）钛手表 钛已用来制造钛表壳及表链等零件。

钛制手表具有质轻、耐腐蚀、无磁性等特点。钛表壳与人体接触时，不会产生过敏反应，这是它有别于不锈钢表壳的一个重要优点，这对欧洲白色人种尤为重要。钛表壳经过适当表面处理之后，不仅硬度高，耐磨损，而且多姿多彩，非常高雅而时尚。瑞士生产的一种钛表（“太空手表”）重仅 50 g，厚度仅 7 mm，却具有多表盘、多功能、防水性强等优点。目前，钛手表已由高级手表转化为大众化手表。我国轻工业发达，已成为世界钛手表的重要生产国，每年有大量钛表出口。

9.3.2　钛在炊具、餐具中的应用

在现代家庭中，不锈钢炊具正在逐步取代普通铁制炊具和铝制炊具。近年来，钛制品也跟在不锈钢制品之后，开始悄悄进入现代家庭之中。钛是一种既不生锈又对人体无害的厨房用金属材料，是比不锈钢更高一个档次的炊具、餐具材料。用钛可做成炒锅、菜刀、剪刀、勺、叉、容器等炊具和餐具。

1）钛炒锅　日本山田工业所和横滨高技术公司共同开发出了一种钛制炒菜锅——“中华锅”。中华锅采用模压法成形。钛锅的成形难度比铁锅要大些。铁锅可一次重叠加工 10 个，钛由于回弹大，一次只能加工 2 个。钛锅厚 1.2 mm，直径 360 mm，重 755 g，比同样尺寸的铁锅（重 1 275 g）轻许多，厨师使用方便。钛锅不生锈，耐盐、酸、醋、碱等各种食品及添加剂的腐蚀。使用寿命长。为减小质量，铁锅壁很薄，铁锅使用寿命仅半年到一年，钛锅可用 3 ~ 5 年。钛热容量小，升温快，有利于节能。钛锅在中餐馆受到欢迎。

2）菜刀和剪刀　做菜刀的材料既要高的硬度和适度韧性，使刀具锋利而不崩裂，又要好成形。

对纯钛、Ti - 6Al - 4V、Ti - 15Mo - 5Zr - 3A、Ti - 15 - 3 等几种钛材的对比试验表明，Ti - 10 - 2 - 3β 型钛合金是最佳的刀具材料，它不仅强度高，而且塑性好，有利于仿形机床成形。在成形时，刃部很少出现锯齿状缺陷。热处理之后，硬度可达 45 ~ 47HRC，与广泛使用的 420 - J2 不锈钢刀具硬度相当。Ti - 10 - 2 - 3 合金刀具非常锋利。经过镜面加工处理，刀具呈现出漂亮的光泽。

日本一家公司开发出了一种剪刀，它是用 Ti - 6Al - 4V 合金制成的，钛剪刀质轻，做花卉剪特别合适，因为可减轻工人的劳动强度。

1995 年，我国一家公司开发出了适于做刀具材料的 Ti - 44528 合金（Ti - 4A1 - 4V - 5Cr - 2Fe - 8Mo）。这是一种亚稳定型 β 钛合金。该合金的冷轧板材经过多级时效强化热处理后，硬度可达到 53HRC，抗拉强度达 1 650 MPa 以上，适于做潜水员在海水中使用的刀具。这种无磁、耐蚀、轻便的刀具，无比锋利，长期使用也不易变钝。这种产品已远销美国，供美国海军使用。制造刀具使用的是厚度为 1.5、2.0、2.5、3.0、4.0、5.0 mm 的板材，可大批量生产。

3）钛餐具　钛可以用做刀叉、汤勺等餐具。经过表面处理，钛刀叉可呈现金黄色，显得很高贵。钛的导热率比铝、钢要低，遇热时不那么烫嘴。

钛合金也用做开瓶器。日本木屋公司与神户制钢公司合作，研制成 Ti - 15 - 3 - 3 - 3 合金开瓶器，它不仅强度高，而且有特殊的光泽，外观美，受客户欢迎。

4）用钛作电板板的净水器　日本东邦技术公司推出了一种以钛取代不锈钢做电极的新型净水器，这种净水器不仅可以制净水，还可以制出碱性、酸性的电解水，在医疗和饮食部门有广泛用途。它的使用对象主要是医院和餐饮服务行业。以钛电极代替不锈钢电板，不仅减重，而且耐蚀性好，使用寿命长。

5）形状记忆合金在家用电器中的应用　TiNi 形状记忆合金是一种新型功能材料，它在本大典的其他部分另有详细介绍，这里仅介绍一下它在家用电器中的几种应用。

① 冷室——温室兼用的空调间风门控制装置的温度传感器兼驱动器（无马达的驱动器）。

② 咖啡壶温控（~90℃）用的小型传感器和驱动器。

③ 煮饭煲盖上的调压口，可控制煮饭温度和时间。

④ 淋浴恒温器上的混合阀栓，采用形状记忆合金弹簧可保持热水的最适温度。

⑤ 家用电器与热水有关的其他应用，如自动干燥库、电子灶、电磁烹调器、净水器、碱离子水生成器等。记忆合金起温度传感器兼驱动器的作用。

9.3.3　装饰物、纪念品

借助化学处理（大气氧化）、阳极氧化和离子镀，在钛的表面可以生成很薄的氧化膜、碳化物膜和氮化钛膜，使钛呈现不同的色彩，以满足不同环境、不同用途的装饰要求，利用钛表面装饰性强的特性，人们已开发出各种钛装饰物和纪念品。

钛表面的氧化膜是半透明的，从钛金属表层的反射光与氧化膜表面的反射光相互作用，就形成各种干涉色。干涉色与氧化膜厚度的大致关系见表 7.5-63。

表 7.5-63　干涉色与钛氧化膜厚度的关系

氧化膜厚度	颜色
10 nm 以下	金属光泽（无色）
10 ~ 25 nm	金黄色
10 ~ 70 nm	蓝色
70 ~ 150 nm	蓝紫色
170 nm 以上	白色

钛颜色氧化膜厚度与大气氧化条件（温度和时间）关系见表 7.5-64。

表 7.5-64　被氧化的钛试样的着色

时间 min	加热温度/℃											
	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850
1	不变	不变	不变	不变	苍黄	深黄	黄褐紫	黄褐	紫	天蓝	微绿	光泽灰色
5	不变	金属色	微黄	淡黄	淡褐	紫色	蓝紫	天蓝	黄绿	赤紫	光泽灰色	光泽灰色
15	不变	微黄	淡黄	淡褐	紫褐	蓝紫	淡蓝	赤紫	暗紫	光泽灰色	光泽灰色	亮灰色
30	不变	苍黄	暗黄	褐	紫	蓝	黄绿	淡绿	光泽灰色	光泽灰色	无光泽灰色	无光泽灰色
60	不变	淡黄	黄褐	紫褐	紫蓝	天蓝	血黄	暗紫	暗紫	无光泽灰色	亮灰	微白
180	微黄	黄	淡褐	紫	蓝	微绿	暗紫	光泽灰色	光泽灰色	亮灰	微白	白色鳞皮

阳极氧化（电化学处理）也在会使钛表面产生不同的氧化膜。通过控制阳极氧化条件（时间和电压）也可以改变氧化膜的厚度和颜色。与大气氧化相比，阳极氧化能更好地控制氧化膜的颜色，因此，阳极氧化处理更实用。阳极氧化处理时，钛氧化着色与阳极氧化电压的关系见表 7.5-65。

表 7.5-65　钛氧化着色与阳极氧化电压的关系

电压/V	颜色	电压/V	颜色
10	暗金色	60	亮金色
20	紫色	70	淡红色
30	蔚蓝色	80	淡紫色
40	淡蓝色	90	青绿色
50	淡黄色	100	鲜绿色

钛氮化处理主要是形成美丽的金黄色，钛离子镀进行碳化处理可以产生黑色。

通过适当的处理，还可以使钛表面的颜色随环境温度而改变，使钛成为一种对温度敏感的非常有趣的产品。

通过表面着色处理制成的钛艺术品有下列9类。

①钛版画；　②钛首饰，如耳环、手镯、项链等；③钛奖杯、奖牌；④钛门牌、单位标牌、牌匾等；⑤钛手杖、钓鱼杆等；⑥钛工艺纪念品，如人物、动物、名胜古迹等；⑦钛办公用品，如笔杆、笔筒、笔架、墨盒、印章、名片、名片盒等；⑧钛旗杆、灯柱等；⑨钛建筑装饰物，如屋顶、墙壁、天花板、梁柱、灯饰等。

日本的长野冬季奥运火炬台就是用彩色钛制成的。

天安门广场旗杆上的金色杆顶是用钛制的。

钛制香味纪念币和香味首饰。我国一些研究单位曾开发出一种钛香味纪念币，它是用粉末冶金和氧化着色、浸香处理相结合的工艺，这种香币不仅具有金、红、黄、绿、蓝、青、褐等不同色彩，而且可持久地散发各种香味，是一种新颖高级的纪念品或馈赠佳品。

日本一家公司制造了一批香味首饰。首饰材料是粉末烧结的纯钛金属，它含有大量肉眼看不到的微小气孔，将香水滴在金属表面，被气孔吸收之后，首饰香气可持续数日。香散尽之后，继续滴香水，又能重新散发香气。这种首饰美观大方，价格也不贵，因而受欢迎。

钛香味纪念品和香味首饰在未来的旅游业中有良好市场前景，关键问题是要解决表面防污和实现批量生产，大幅度降低生产成本。

一些典型的钛艺术品、体育用品与生活用品示于图7.5-23。

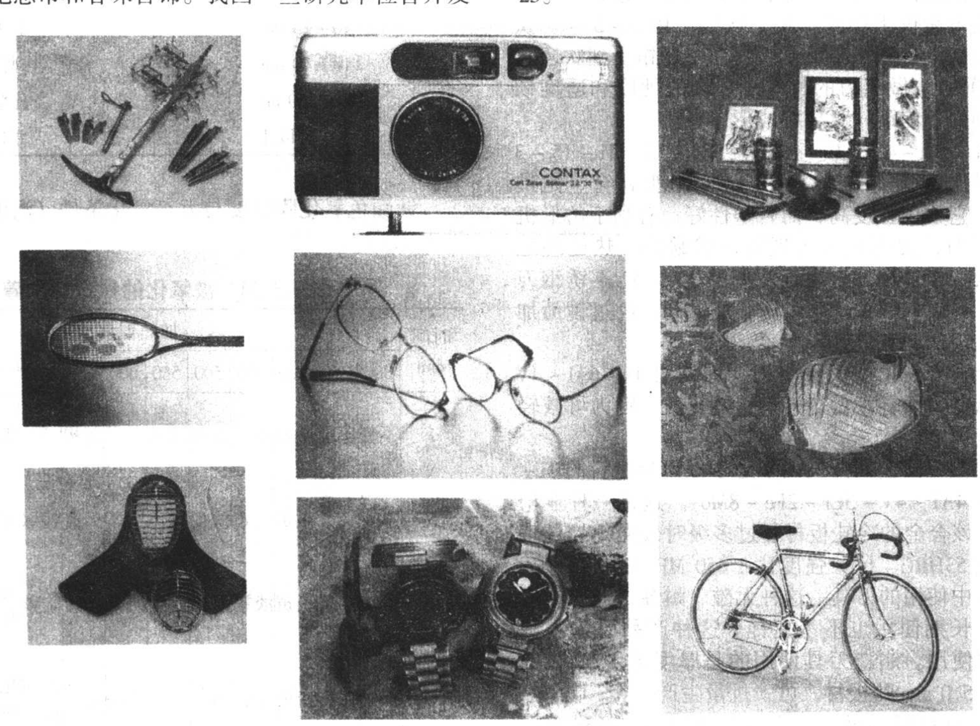


图7.5-23　钛艺术品、体育用品与生活日用品

10　钛及钛合金应用资料

表7.5-66～表7.5-85为钛及钛合金应用资料表，可供钛设备设计制造者参考。

表7.5-66为各国现行钛容器规范；表7.5-67为各国钛容器规范规定的许用钛材；表7.5-68为各国钛容器规范规定的安全系数；表7.5-69为各国钛容器规范规定的钛材最大许用拉伸应力值；表7.5-70为各国钛容器规范规定的焊接接头系数；表7.5-71为各国钛容器规范规定的许用设计温度范围；表7.5-72为各国钛压力容器规定的最高设计压力；表7.5-73为钛在硫酸溶液中的耐腐蚀性（自然通气）；表7.5-74为在硫酸溶液中氧化剂或重金属离子对钛腐蚀的影响；表7.5-75为硫酸溶液中通氯气对钛腐蚀性能的影响；表7.5-76为钛对硫酸溶液的耐蚀性（通空气和通净化氮气）；表7.5-77为钛对盐酸溶液的耐腐蚀性（通气）；表7.5-78为钛在硫酸－硝酸的混合酸中的耐腐蚀性；表7.5-79为钛在盐酸－硝酸的混合酸中的耐腐蚀性；表7.5-80为钛在有机酸中的耐蚀性；表7.5-81为钛在其他无机酸中的耐蚀性；表7.5-82为钛在碱溶液中的耐蚀性；表7.5-83为钛在无机盐溶液中的耐蚀性；表7.5-84为在盐酸溶液中氧化剂或重金属离子对钛腐蚀率的影响；表7.5-85为钛在氯化物溶液中的耐腐蚀性。

表7.5-66　各国现行钛容器规范

国家	规范编号	规范名称	附注
美国	ASM E－1992	美国锅炉和压力容器规范	包括钛容器
日本	ASM E－1998 JISB 8270－1993	压力容器（基本规格）	包括钛容器
	JSIB 8240－1986	制冷用压力容器结构	包括钛容器

续表 7.5-66

国家	规范编号	规范名称	附注
法国	CODAP - 1990 CODAP - 1995（E）	法国压力容器建造规范	包括各种材料的容器，钛容器只规定了安全系数
俄罗斯	OCT 26 - 11 - 06 - 85 （1987修订）	钛和钛合金焊制容器和设备，一般技术要求	
	OCT 26 - 01 - 279 - 78 （1982年起实施）	钛制容器和设备强度计算方法和规定	
	OCT 26 - 01 - 771	钛容器疲劳强度计算方法和规定	
	OCT 26 - 01 - 1298 - 81	钛制容器和设备法兰的结构和尺寸，强度和密封的计算方法	
	PДPTM 26 - 01 - 133 - 81	钛和钛合金容器和设备，低周载荷的强度计算方法和规定	
	PД24，200，17 - 90 （1991年起实施）	钛制容器和设备强度计算方法和规定	
	PДPTM 26 - 01 - 114 - 78 （1985年修订）	AT3钛制容器和设备的法兰连接，强度和密封的计算方法	
中国	陕 DB 3464 - 1986	钛制焊接压力容器技术条件	省标，无设计内容
	陕 DB 3465 - 1986	钛制列管工换热器技术条件	省标，无设计内容
	陕 DB 3466 - 1986	钛制容器包装，运输	省标
	CD 130A8 - 1987	钛制设备设计技术规定	局标
	CD 130A9 - 1987	钛制设备技术条件	局标
	JB 4730 - 1993	压力容器无损检测	包括钛容器
	JB 4745 - 2000	钛制焊接容器	
	GB 151 - 1999	管壳式换热器	包括钛换热器
	JB 4730 - 1994	压力容器无损检测	包括钛容器无损检测
	GB/T 13149 - 1991	钛及钛合金复合钢板焊接技术条件 压力容器安全技术监察规程 （1999年版）	国家质量与安全技术监察局颁布，包含了钛容器
英国	CP3003，第9部分	化工容器和设备的衬里——衬钛化工容器和设备制造规范	

表 7.5-67 各国钛容器规范规定的许用钛材

钛容器规范	钛材标准	钛材类型	许用钛材牌号
中国 JB 4745 - 2000	GB/T 3621	板	TA0，TA1，TA2，TA3，TA9，TA10
	GB/T 3624	管	TA0，TA1，TA2，TA9，TA10
	GB/T 3625	换热管	TA0，TA1，TA2，TA9，TA10
	GB/T 2965	棒	TA0，TA1，TA2，TA3，TA9，TA10
	GB/T 16598	锻件	TA0，TA1，TA2，TA3，TA9，TA10
	GB/T 15073 及 GB/T 6614	铸件	ZTA1，ZTA2
	GB/T 8547	钛钢复合板	金属为 TA0 ~ TA2，TA9，TA10
	GB/T 8546	钛不锈钢复合板	金属为 TA0 ~ TA2，TA9，TA10

续表 7.5-67

钛容器规范	钛材标准	钛材类型	许用钛材牌号
ASME - 1992 及 ASME - 1998	SB - 265	板，带	Grade1，2，3，7，9，11，12，16，17
	SB - 337	无缝与焊接配管	Grade1，2，3，7，9，12
	SB - 338	无缝与焊接换热管	Grade1，2，3，7，9，12，16
	SB - 381	锻件	F1，F2，F3，F7，F12，F9，F16
	SB - 348	棒	Grade1，2，3，7，12，9，16
	SB - 367	铸件	C - 2，C - 3
JIS B8270 - 1993（1类容器用）	JIS H4600	板，带	1级，3级，12级
	JIS H4630	无缝与焊接配管	1级，3级，12级
	JIS H4631	无缝与焊接换热器	1级，3级，12级
	JIS H4650	棒	1级，3级，12级
	JIS G3603	钛钢复合板	复层为1级
JIS B8270 - 1993（2，3类容器用）	JIS H4600	板，带	1级，2级，3级，12级，13级
	JIS H4630	无缝与焊接配管	1级，2级，3级，12级，13级
	JIS H4631	无缝与焊接换热器	1级，2级，3级，12级，13级
	JIS H4650	棒	1级，2级，3级，12级，13级
	JIS G3603	钛钢复合板	复层为1级，2级
JIS B8240 - 1986	JIS H4600	板，带	1级，3级，12级
	JIS H4630	无缝与焊接配管	1级，3级，12级
	JIS H4631	无缝与焊接换热器	1级，3级，12级
	JIS H4650	棒	1级，3级，12级
	JIS G3603	钛钢复合板	复层为1级，2级
OCT 26 - 11 - 06 - 85	ГОСТ 22178	薄板（0.3～10.5 mm）	BT1 - 00，BG1 - 0，OT4 - 0
	ГОСТ 23755	厚板（11～150 mm）	BT1 - 00，BG1 - 0，OT4 - 0
	ГОСТ 90050	冷拉无缝管	BT1 - 00，BG1 - 0，OT4 - 0
	ГОСТ 21945	热作无缝（ϕ83～480 mm）	BT1 - 0
	ГОСТ 24890	焊接管	BT1 - 00，BG1 - 0，OT4 - 0
	ГОСТ 22897	冷拉管（ϕ6～62 mm）	BT1 - 0，ПТМ
	ГОСТ 26492	棒	BT1 - 00，BG1 - 0，OT4 - 0
	ОСП - 9000	锻件（＜200 mm）	BT1 - 00，BG1 - 0，OT4 - 0
	TY Ⅰ - 805 - 152	锻件（＞200 mm）	BT1 - 00，BG1 - 0，OT4 - 0
	TY 14 - 3 - 161	无缝管（ϕ3～5 mm）	ПТМ
	TY 14 - 3 - 1027	无缝管（ϕ90～130 mm）	ПТМ
	TY 14 - 3 - 1119	无缝管（ϕ110～273 mm）	ПТМ
OCT26 - 01 - 279 - 78		钛材	BT1 - 0，OT4 - 0，AT3
中国	GB 3621	板	TA1，TA2，TA3，TA9，TA10
	GB 3624	无缝配管	TA1，TA2，TA9，TA10
	GB 3625	无缝换热管	TA1，TA2，TA9，TA10
	GB 4367	焊接配管	TA1，TA2，TA9，TA10
	GB 4368	焊接换热管	TA1，TA2，TA9，TA10
	GBn 194	锻饼	TA2，TA3，TA9，TA10
	GBn 195	锻环	TA2，TA3，TA9，TA10

表 7.5-68 各国钛容器规范规定的安全系数

国家	钛容器规范	类型	抗拉强度安全系数 n_b	屈服强度安全系数 n_s	疲劳强度安全系数 n_N
美国	ASME - 1993	加工材	4	1.5	
	ASME - 1998	常规设计容器	3.5	1.5	
	ASME - 1998	分析设计容器	3	1.5	
日本	JIS B8270 - 1993	1类容器	3	1.5	
		2类容器	4	1.5	
		3类容器	4	1.5	
		螺栓	设计温度取4，常温取5，两个应力最小值作为许用应力	设计温度取1.5，常温取4，两个应力最小值作为许用应力	
法国	OCDAP - 1992	常规设计容器	3		
	OCDAP - 1995（E）	常规设计容器	3		
俄罗斯	OCT 26 - 01 - 279 - 78	常规设计容器	3		
	РД PTM26 - 01 - 133 - 81	加工材	3		30
	РД PTM26 - 01 - 114 - 78	螺栓	3.7		30
中国	CD 130 A8 - 87	加工材	4	1.5	
	压力容器安全技术监察规程	加工材	4	1.5	
		常规设计容器	3	1.5	
		螺栓	5	4	
	JB 4745 - 2000	常规设计容器	3	1.5	
		铸件	3/0.8	1.5/0.8	
日本	JISB 8240 - 1986	加工材	4	1.5	

表 7.5-69 各国钛容器规范规定的钛材最大许用拉伸应力值

钛容器规范	钛材类型	钛牌号	室温 σ_b /MPa >	室温 $\sigma_{0.2}$ /MPa >	设计温度（℃）下的最大许用拉伸应力值/MPa									
					-268	-196	-60	-50	-30	0	20	40	75	100
ASME - 1992	压力加工	1级，F1	241	172			61	61	61	61	61	61	54	49
		2级，F2	345	276			86	86	86	86	86	86	80	73
		3级，F3	448	379			112	112	112	112	112	112	105	96
		7级，F7	345	276			86	86	86	86	86	86	80	73
		12级，F12	483	345			121	121	121	121	121	121	119	111
		1级	241	172			52	52	52	52	52	52	46	42
		2级	345	276			73	73	73	73	73	73	69	63
		3级	448	379			96	96	96	96	96	96	89	82
		7级	345	276			73	73	73	73	73	73	69	63
		12级	483	345			103	103	103	103	103	103	101	94
		C2	345	276			86	86	86	86	86	86	77	70
		C3	448	379			118	118	118	118	118	118	101	94
JIS B8270 - 1993（1类容器）	带、棒无缝管	1级	270	165	90	90	90	90	90	90	90	90	71	62
		3级	480	345	160	160	160	160	160	160	160	160	137	127
		12级	345	275								115	115	108
		1级	270		76	76	76	76	76	76	76	76	60	53
		3级	480		136	136	136	136	136	136	136	136	116	108
		12级	345	275								98	98	92

续表 7.5-69

钛容器规范	钛材类型	钛牌号	室温 σ_b /MPa	室温 $\sigma_{0.2}$ /MPa	设计温度（℃）下的最大许用拉伸应力值/MPa									
					-268	-196	-60	-50	-30	0	20	40	75	100
JIS B8270-1993（2类、3类容器）	带、板无缝管	1级	270		68	68	68	68	68	68		64	55	50
		2级	340		85	85	85	85	85	85		85	55	50
		3级	480		120	120	120	120	120	120		120	118	111
		12级	340											
		13级	340											
	焊接管	1级	270		58	58	58	58	58	58		54	47	42
		2级	340		72	72	72	72	72	72		72	69	63
		3级	480		102	102	102	102	102	102		102	100	94
		12级	340											
		13级	480											
JIS B8240-1986	带、板、无缝管	1级	270		68	68	68	68	68	68		64	55	50
		2级	340		85	85	85	85	85	85		80	55	50
		3级	480				120	120	120	120		115	103	94
	焊接管	1级	270		59	59	59	59	59	59		54	47	42
		2级	340		74	74	74	74	74	74		69	61	55
		3级	480			103	103	103	103	103		97	87	80
OCT26-01-279-78	压力加工材	BT1-0	380					127	127	127	127			112
		OT4-0	480					160	160	160	160			138
		AT3	600					200	200	200	200			176
CD130A8-87	压力加工材	TA1	343		86	86	86	86	86	86		80	72	65
		TA2	441			125	125	125	125	125		103	88	79
		TA3	561				152	152	152	152		127	109	97
		Ti-7	341					86	86		86	72	65	
		Ti-12	480						121	121		121	121	121
	焊接管	TA1	343		73	73	73	73	73	73		68	61	55
		TA2	441			106	106	106	106	106		88	75	67
		TA3	561				129	129	129	129		108	93	82
		Ti-7	341						73	73		68	61	55
		Ti-12	480						103	103		103	103	95
JB（草案）如按 $n_b=4$	压力加工材	TA0	280		70	70	70	70	70	70	70	64	55	49
		TA1	370		29	29	29	29	29	29	29	84	72	65
		TA2	440		110	110	100	110	110	110	110	110	86	95
		TA3	540		135	135	135	135	135	135	135	123	106	95
		TA9	370		92	92	92	92	92	92	92	84	72	65
		TA10	485		121	121	121	121	121	121	121	111	95	85
	焊接管	TA0	280		59	59	59	59	59	59	59	54	46	42
		TA1	370		78	78	78	78	78	78	78	72	61	55
		TA2	440			93	93	93	93	93	93	85	73	66
		TA3	540			114	114	114	114	114	114	105	90	81
	饼材	TA2	410		102	102	102	102	102	102	102	93	80	72
		TA3	510			127	127	127	127	127	127	112	96	86
	锻环	TA2	390		97	97	97	97	97	97	97	89	76	68
		TA3	490		122	122	122	122	122	122	112	96	86	

续表 7.5-69

钛容器规范	钛材类型	钛牌号	室温 σ_b /MPa	室温 $\sigma_{0.2}$ /MPa	设计温度（℃）下的最大许用拉伸应力值/MPa									
					－268	－196	－60	－50	－30	0	20	40	75	100
JB（草案）如按 $n_b=4$	压力加工材	TA0	280		93	93	93	93	93	93	93	85	73	65
		TA1	370		123	123	123	123	123	123	123	113	97	87
		TA2	440			146	146	146	146	146	146	134	115	103
		TA3	540			180	180	180	180	180	180	164	141	127
		TA9	370			123	123	123	123	123	123	113	67	87
		TA10	485			161	161	161	161	161	161	148	127	114
	焊接管	TA0	280		79	79	79	79	79	79	79	72	62	56
		TA1	370		104	104	104	104	104	104	104	96	82	74
		TA2	440			124	124	124	124	124	124	114	98	88
		TA3	540			153	153	153	153	153	153	142	120	108
	饼材	TA2	410		136	136	136	136	136	136	136	125	107	96
		TA3	510			170	170	170	170	170	170	155	133	120
	锻环	TA2	390		130	130	130	130	130	130	130	119	102	91
		TA3	490			163	163	163	163	163	163	149	128	115

钛容器规范	钛材类型	钛牌号	设计温度（℃）下的最大许用拉伸应力值/MPa										
			125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	400
ASME－1992	压力加工材	1级，F1	44	40	36	34	32	29	26	23			
		2级，F2	67	62	58	54	51	47	44	41			
		3级，F3	88	80	72	65	59	54	49	44			
		7级，F7	67	62	58	54	51	47	44	41			
		12级，F12	104	98	92	87	83	80	77	76			
	焊接管	1级	37	34	31	29	27	25	23	20			
		2级	57	53	49	45	43	40	38	35			
		3级	76	69	61	55	50	46	42	37			
		7级	57	53	49	45	43	40	38	35			
		12级	88	83	78	74	70	68	66	64			
	铸件	C2	65	59	55	49	45	43					
		C3	86	79	71	63	57	52					
JIS B8270－1993（1类容器）	板，带，棒，无缝管	1级	57	53	48	44	40	37	33	29	28		
		3级	116	108	96	84	76	71	64	58	53		
		12级	92	84	76	69	64	57	53	50	40		
	焊接管	1级	48	45	41	37	34	31	28	25	24		
		3级	99	92	82	71	65	60	54	49	45		
		12级	78	71	65	59	54	48	45	43	42		
IS B8270－1993（2类，3类容器）	板、带、棒、无缝管	1级	45	40	37	33	31	28	27	25	24	24	
		2级	68	62	58	54	51	47	44	41	30	29	
		3级	104	98	92	87	83	79	77	76	46	43	
		12级	68	62	58	54	51	47	44	41	30	29	
		13级	104	98	92	87	83	79	77	76	46	43	
	焊接管	1级	38	34	31	28	26	25	24	22	21	20	
		2级	58	53	49	46	43	40	37	35	25	25	
		3级	88	83	78	75	71	68	66	64	39	36	
		12级	58	53	49	46	43	40	37	35	25	25	
		13级	88	83	78	75	71	68	66	64	39	37	

续表 7.5-69

钛容器规范	钛材类型	钛牌号	设计温度（℃）下的最大许用拉伸应力值/MPa										
			125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	400
JIS B8240－1986	板、带、棒、无缝管	1级	45	40	37	33	31	29	28	26	25	24	
		2级	60	55	49	45	40	37	34	32	30	29	
		3级	87	80	75	68	63	58	54	50	46	43	
	焊接管	1级	38	34	31	29	27	25	24	22	21	20	
		2级	51	47	42	38	34	31	29	28	26	26	
		3级	76	69	64	58	53	49	46	42	39	36	
OCT26－01－279－78	压力加工材	BT1－0				93		83		75			
		OT4－0				111		100		85		83	81
		AT3				149		143		138		126	
CD130A8－87	压力加工材	TA1	60	55	49	45	40	37	34	32	30	29	
		TA2	72	65	59	54	49	46	43	40	38	37	
		TA3	87	79	73	66	61	57	53	50	49	45	
		TA9	60	55	49	45	40	37	34	32	30	29	
		TA10	104	97	91	86	80	79	78	76	75	73	
	焊接管	TA1	51	47	42	38	34	31	29	27	26	25	
		TA2	61	55	50	46	42	39	37	34	32	31	
		TA3	74	67	62	56	52	48	45	43	42	38	
		TA9	51	47	42	38	74	31	29	27	26	25	
		TA10	88	82	77	73	68	67	66	65	64	62	
JB（草案）如按 $n_b=4$	压力加工材	TA0	44	40	36	33	30	28	26	25	24	23	
		TA1	58	53	48	44	40	37	35	33	31	30	
		TA2	70	63	57	52	48	45	42	39	37	36	
		TA3	85	77	70	64	59	55	51	48	46	44	
		TA9	58	53	48	44	40	37	35	33	31	30	
		TA10	77	69	63	58	53	49	46	43	41	39	
	焊接管	TA0	37	34	31	28	26	24	22	21	20	19	
		TA1	50	45	41	37	34	32	30	28	27	25	
		TA2	59	53	49	44	41	38	35	33	32	30	
		TA3	73	66	60	55	50	47	44	41	39	37	
	饼材	TA2	65	59	53	49	45	42	39	37	35	33	
		TA3	78	70	64	58	54	50	47	44	42	40	
	锻环	TA2	62	56	51	46	43	40	37	35	33	32	
		TA3	78	70	64	58	54	50	47	44	42	40	
JB（草案）如按 $n_b=3$	压力加工材	TA0	59	53	48	44	41	38	35	33	32	30	
		TA1	78	71	64	59	54	50	47	44	42	40	
		TA2	93	84	76	70	64	60	56	53	50	48	
		TA3	114	103	94	86	79	73	69	65	61	59	
		TA9	78	71	64	59	54	50	47	44	42	40	
		TA10	102	93	84	77	71	66	62	58	55	53	
	焊接管	TA0	50	45	41	38	35	32	30	28	27	26	
		TA1	66	60	54	50	46	43	40	37	36	34	
		TA2	79	71	65	59	55	51	47	45	42	40	
		TA3	97	88	80	73	67	62	58	55	52	50	
	饼材	TA2	87	78	71	65	60	56	52	49	46	44	
		TA3	108	97	89	81	75	69	65	61	58	55	
	锻环	TA2	82	74	68	62	57	53	49	47	44	42	
		TA3	104	94	85	78	72	67	62	59	56	53	

注：ASME－1992 原为英制单位，已参照过去的公制版本换算成公制。

表7.5-70 各国钛容器规范规定的焊接接头系数

钛容器规定	焊缝类型	射线探伤比例			按容器组别确定探伤比例
		全部	部分	不探	
ASME—1992，1998 JIS B8270—1993 JIS B8240—1986	双面对接焊或相当于双面焊的单面对接焊	1.0	0.95	0.70	
	带垫板单面对接焊，焊后保留垫板	0.90	0.85	0.65	
	不带垫板的单面对接焊			0.60	
	双面满角搭接焊			0.55	
	单面满角搭接焊，加塞焊			0.50	
	单面满角搭接焊，不塞焊			0.45	
OCT26—11—06—85	双面对接焊，双面全熔合				0.95
	双面丁字接头，全熔合				0.90
	丁字接头，不保证全熔合				0.80
	单面对接焊，单面保护				0.70
РДРТМ26—01—133—81	BT1-00和BT1-0，双面对接或丁字接头，双面熔合				1.00
	BT1-00和BT1-0带垫板，单面对接焊				0.80
	OT4-0，双面对接或丁字接头、双面熔合				0.95
	OT4-0，带垫板，单面对接焊				0.80
	AT3，双面对接或丁字接头，双面熔合				0.90
	AT3，带垫板，单面对接焊				0.75
CD130A8—87 JB（草案）	双面对接焊	0.90	0.85	0.70	
	带垫板，单面对接焊	0.85	0.80	0.65	
	无垫板，单面对接焊			0.60	
	双面搭接填角焊			0.55	
	单面搭接填角焊			0.50	

注：按OCT26-11-06-85规定，射线与超声探伤比例按钛容器的组别定，1组、2组为100%，3组为50%，4组、5a组为25%，5b组为10%。钛容器的分组按压力、温度及介质危害性划分，详见该规范。

表7.5-71 各国钛容器规范规定的许用设计温度范围

钛容器规范	钛材牌号（或类型）	许用最高设计温度/℃	许用最低设计温度/℃
美 ASME-1998	Grade 1、2、3、7、9、11、12、16、17 C1、C2	315（600°F） 260（500°F）	-60（测定低温塑性可更低）
日 JSIB 8270-1993 （1类容器） （2，3类容器） 日 JIS 8240-1986	1种、3种 12种 1种、2种、3种 12种、13种 1种、2种 3种	325 325 350 350 350 350	-268 40 -268（3类容器0℃） 40 -268 -196
俄 OCT26-11-06-1985 俄 OCT 26-01-279-1978	BT1-00、BT1-0、ПТ1М OT4-0 BT1-0 OT4-0 AT-3	300 400 300 400 350	-50 -50
中国 JB 4745-2000	TA0、TA1、TA2、TA3、TA9、TA10 复合板 衬钛 ZTA1、ZTA2	300 350 250 250	-269（低于-60℃则加试伸长率） -269
英 CP 3003，N09	衬钛	205	

表 7.5-72　各国钛容器规范规定的最高设计压力

国家	钛容器规范		钛容器最高设计压力/MPa
美	ASME—1998		20
日	JISB 8270—1993	1类容器	100
		2类容器	30
		3类容器	1
	JISB 8240—1986		5
俄	OCT 26-11-06—1985		10
中	JB 4745—2000		35

表 7.5-73　钛在硫酸溶液中的耐腐蚀性（自然通气）

浓度/%	温度/℃	腐蚀速度/mm·a⁻¹	浓度/%	温度/℃	腐蚀速度/mm·a⁻¹
1	室温	0.002 5	5	室温	0.002 5~0.2（钝化界线）
1	60	0.008	5	60	4.8
1	沸点	9	5	沸点	24
2	60	0.008	10	室温	0.25
3	室温	0.005	40	室温	1.8
3	60	0.013	60	室温	0.6
4	60	1.7	80	室温	15

表 7.5-74　在硫酸溶液中氧化剂或重金属离子对钛腐蚀的影响

添加剂	硫酸浓度/%	温度/℃	腐蚀速度/mm·a⁻¹
硫酸铜 0.25%	5	95	0
0.5%	5	95	0.010
0.1%	5	95	0.010
0.25%	30	37	0.06
0.25%	30	95	0.09
0.5%	30	37	0.06
1.0%	65	38	0.08
0.5%	30	37	0.06
1.0%	65	38	0.08
硫酸铁 2 g/L	10	沸腾	0.13
铁 16 g/L	20	沸腾	0.13
硫酸铁 7%~8%	17	60	0.13
0.5% CrO_3	5	95	0
0.5% CrO_3	30	95	0
5% MnO_3	40	室温	0.015
钛 4.8 g/L	40	10	钝性
硝酸 10%	90	室温	0.46
30%	70	室温	0.63
70%	30	室温	0.10
90%	10	室温	0
90%	10	65	0.010
氯饱和的硫酸	45	室温	0.002 5
	62	室温	0.001 5
	10	190	0.05
	20	190	0.33

表 7.5-75　硫酸溶液中通氯气对钛腐蚀性能的影响

硫酸通氯气	温度/℃	时间/h	腐蚀速度/mm·a⁻¹		
			液相	气相	气液相交界
10% + 游离氯	20~60	200	<0.01	0.00	<0.01
10% + 游离氯	90	200	0.28	0.00	0.13
20% + 游离氯	20~60	200	<0.05	0.00	<0.05
20% + 游离氯	90	200	0.33	0.00	0.16
40% + 游离氯	60	200	0.11	0.00	0.08
40% + 游离氯	90	200	1.19	0.00	0.78
60% + 游离氯	20	200	0.01	0.00	0.01
60% + 游离氯	60	200	0.38	0.00	0.29
60% + 游离氯	90	200	12.21	0.02	6.66
80% + 游离氯	20	25	0.04	87.67 34 h以后金属烧掉	0.02
95% + 游离氯	20	200	0.78	7h 金属燃烧	—
50% + 饱和硫酸铜	50~80	120	<0.50	—	—

表 7.5-76　钛对硫酸溶液的耐腐蚀性（通空气和通净化氮气）

浓度/%	温度/℃	腐蚀速度/mm·a－1	
		通空气	通净化氮气
1	沸腾	10.6	7.2
2	100	18.7	16.6
3	100	23.4	21
4	100	21.3	23.6
5	100	20.6	26.8
10	35	3.8	3.7
20	35	2.3	1.5
40	35	8.7	6.7
60	25	1.09	0.7
80	35	36.6	41.6

表 7.5-77　钛对盐酸溶液的耐腐蚀性（通气）

浓度/%	温度/℃	腐蚀速度/mm·a⁻¹	浓度/%	温度/℃	腐蚀速度/mm·a⁻¹
0.5	35	0.001	5	60	1.07
0.5	100	0.009	7.5	35	0.28
1	35	0.003	10	35	1.07
1	60	0.004	10	60	6.8
1	100	0.46	15	35	2.4
2	60	0.016	20	35	4.4
2	100	6.9	37	35	15
5	35	0.009			

表 7.5-78　钛在硫酸－硝酸的混合酸中的耐腐蚀性

酸浓度/%		温度/℃	腐蚀速度/mm·a⁻¹
硫酸	硝酸		
0	100	60	0.008
1	99	60	0.002 5
5	95	60	0.005
10	90	室温	0
10	90	60	0.010
50	50	室温	0.63
50	50	60	0.38
70	30	室温	0.63
80	20	60	1.57
90	10	室温	0.46
95	5	60	1.88
99	1	60	1.90

表 7.5-79　钛在盐酸－硝酸的混合酸中的耐腐蚀性

酸浓度/%		温度/℃	腐蚀速度/mm·a⁻¹
盐酸	硝酸		
5	1	40	0
5	5	40	0.02
5	5	95	0.03
5	10	40	0
5	10	95	0.18
5	3	80	0.05
8.5	5	沸腾	0.08
1	—	室温	0
王水	—	80	0.86

表 7.5-80　钛在有机酸中的耐腐蚀性

酸	浓度/%	温度/℃	腐蚀速度/mm·a⁻¹
醋酸	99	沸腾	0.002 5
己二酸	67	240	0
苯甲酸	饱和	室温	0
丁酸	100	室温	0
苹果酸＋马来酸＋富马酸（反丁烯二酸）	—	200	0.06
	0.5	60	2.39
草酸	1	35	0.15
	1	60	4.5
	1	100	21.0
	5	35	0.13
	10	60	11.4
丙酸	蒸气	190	溶解（快速）
硬脂酸	100	180	0.002 5
琥珀酸	100	185	0
丹宁酸	25	100	0
对苯二甲酸	77	225	0
柠檬酸	10	100	0.009 144
柠檬酸	25	64	0.001 016
柠檬酸	50	64	0.000 254
柠檬酸	50	沸腾	0.127～1.27
柠檬酸（不通气）	50	沸腾	0.358 14

续表 7.5-80

酸	浓度/%	温度/℃	腐蚀速度/mm·a⁻¹
甲酸	10	100	0.004 572
甲酸（不通气）	10	沸腾	1.27
甲酸	25	100	0.001 016
甲酸（不通气）	25	100	2.438 4
甲酸	50	100	0.001 016
甲酸（不通气）	50	100	7.62
甲酸	90	100	0.001 27
甲酸（痕量的环己烷）	90	45	<0.002 54
乳酸	10	64	0.002 54
乳酸	10	100	0.047 75
乳酸（不通气）	10	沸腾	0.013 97
乳酸（不通气）	25	沸腾	0.027 686
乳酸	50	100	<0.127
乳酸	85	沸腾	0.010 16
鞣酸	25	100	0.127
酒石酸	10	100	0.127

表 7.5-81　钛在其他无机酸中的耐腐蚀性

酸	浓度/%	温度/℃	腐蚀速度/mm·a⁻¹
硼酸	饱和	室温	0
	10	沸腾	0
铬酸	10	沸腾	0.002 5
	15	24	0.005
	15	82	0.015
	36.5	90	0.046
	50	24	0.013
	50	82	0.025
氟硼酸	5～20	高温	快速
氟硅酸	10	室温	47.5
氢溴酸	40	室温	0
氢碘酸	10	沸腾	0
	57	室温	0.15
氨基磺酸	10	沸腾	16
亚硫酸	6	室温	0.000 5

表 7.5-82　钛在碱溶液中的耐腐蚀性

碱	浓度/%	温度/℃	腐蚀速度/mm·a⁻¹
氢氧化铵	28	室温	0.002 5
氢氧化钡	饱和	室温	0
氢氧化钙	饱和	室温	0
	饱和	沸腾	0
氢氧化镁	饱和	室温	0
氢氧化钾	10	沸腾	0.13
	25	沸腾	0.3
	50	室温	0.010
	50	沸腾	2.7
13%氢氧化钾＋13%氯化钾		29	0

续表 7.5-82

碱	浓度/%	温度/℃	腐蚀速度/mm·a⁻¹
氢氧化钠	10	沸腾	0.02
	28	室温	0.002 5
	40	80	0.13
	50	38 ~ 57	0.000 25 ~ 0.013
	50	60	0.013
	73	130	0.18
	50 ~ 73	190	1.09
	饱和	室温	0
10%氢氧化钠 + 15%氯化钠		82	0
50%氢氧化钠 + 游离氯		38	0.023
60%氢氧化钠 + 2%次氯酸钠 + 微量氨		129	0
碳酸钠	20%	沸腾	0.005 08

表 7.5-83　钛在无机盐溶液中的耐腐蚀性

盐	浓度/%	温度/℃	腐蚀速/mm·a⁻¹	盐	浓度/%	温度/℃	腐蚀速/mm·a⁻¹
销酸铝	饱和	室温	0.015	氨基磺酸镍	50	沸腾	< 0.012
硫酸铝	6.5	71	0.005	溴化钾	饱和	室温	0
	饱和	室温	0	重铬酸钾	饱和	室温	0
碳酸氢铵	50	100	0	铁氰化钾	饱和	室温	0
碳酸铵	50	沸腾	0	碘化钾	饱和	室温	0
氯酸铵	30	50	0.002 5	高锰酸钾	饱和	室温	0
硝酸铵	28	沸腾	0	硫酸钾	10	室温	0
高氯酸铵	20	85	0	硝酸银	50	室温	0
磷酸铵	10	室温	0	硫酸氢钠	10	65	1.83
硫酸铵	10	100	0		10	沸腾	20.3
	10	沸腾	0	亚硫酸氢钠	25	沸腾	0
碳酸钡	饱和	室温	0	碳酸钠	25	沸腾	0
硝酸钡	10	室温	0	氯酸钠	饱和	室温	0
碳酸钙	饱和	沸腾	0	氰化钠	饱和	室温	0
次氯酸钙	6	100	0.001 3	重铬酸钠	饱和	室温	0
硫酸钙	饱和	60	0	硝酸钠	饱和	室温	0
硝酸铜	饱和	室温	0	亚硝酸钠	饱和	室温	0
硫酸铜	50	沸腾	0	磷酸钠	饱和	室温	0
氰化铜	饱和	室温	0	硅酸钠	25	沸腾	0
硫酸铁	10	室温	0	硫酸钠	20	沸腾	0
硫酸亚铁	饱和	室温	0	硫化钠	10	沸腾	0.025
硫酸镁	饱和	室温	0	亚硫酸钠	饱和	沸腾	0
氰化汞	饱和	室温	0	硫酸锌	饱和	室温	0
硝酸镍	50	室温	0				

表 7.5-84　在盐酸溶液中氧化剂或重金属离子对钛腐蚀率的影响

添加剂	盐酸浓度/%	温度/℃	腐蚀速度/mm·a⁻¹
硫酸铜 0.05%	5	40	0.04
	5	95	0.09
1.0%	5	40	0.03
0.05%	5	95	0.09
0.5%	5	沸腾	0.06
0.05%	5	沸腾	0.08
1.0%	10	66	0.03
0.05%	10	66	0.017
0.5%	10	沸腾	0.28
	10	沸腾	0.28

续表 7.5-84

添加剂	盐酸浓度/%	温度/℃	腐蚀速度/mm·a⁻¹
CrO_3 0.5%	5	95	0.025
1%	5	95	0.25
$NaClO_3$ 2.5%	10	80	0.01
1%	10	80	0.008
Ti^{4+} + 1.0 g/L	10	沸腾	0
5.76 g/L	20	沸腾	0
HNO_3 1.0%	5	95	0.09
5.0%	5	95	0.005
3.0%	8.5	80	0.05
5.0%	1	沸腾	0.08
王水		室温	0
		80	0.86
氯气饱和的盐酸	3	190	0.025
	5	190	0.025
	10	190	28.4
氯气 0.02%	36	室温	0.43

表 7.5-85　钛在氯化物溶液中的耐腐蚀性

试　剂	浓度/%	温度/℃	腐蚀速度/mm·a⁻¹
氯化铝	5 ~ 10	60	0.003
	10	100	0.002
	10	150	0.033
	25	室温	0.001
	25	60	0
	25	100	6.6
	25	沸腾	50
	40	122	100
氯化铵	饱和	100	0
氯化钡	20	100	0
	25	沸腾	0
氯化钙	5	100	0.000 5
	55	105	0.000 5
	62	155	钝化界线
	73	175	0.76
氯化铜	1 ~ 20	100	0.005 ~ 0.001 3
	55	118	0.002 5
氯化亚铜	50	90	0.002 5
氯化铁	1 ~ 30	100	0.000 8 ~ 0.004
	50	110	0.018
氯化锂	50	150	0
氯化镁	5	100	0.000 8
	20	100	0.01
	50	200	0.005
氯化锰	5，20	100	0
氯化汞	饱和	100	0.001
氯化镍	5，20	100	0.004
氯化钾	30	110	0.013
	饱和	60	0
氯化锡	24	沸腾	0.046
氯化钠	饱和	沸腾	0.001 3
氯化锌	20	104	0
	75	150	0.06
	80	173	2.1
	90	250	30

编写：邓炬（西北有色金属研究院）

参考文献

1 航空航天材料咨询研究组．航空航天材料咨询报告．北京：国防工业出版社，1999

2 北京航空材料研究院．中国航空材料手册．第2版．北京：中国标准出版社，2002

3 张承濂等．船舶材料手册．北京：国防工业出版社，1993

4 化工材料咨询报告编委会．化工材料咨询报告．北京：中国石化出版社，1999

5 石玉峰，江河，刘振球等．钛技术与应用．西安：陕西科学技术出版社，1990

6 曹春晓，庞克昌，王敬生，孙建科等．钛科学与工程（第十一届全国钛及钛合金学术交流会论文集）．金属学报，2002，第38卷增刊

7 王哲．飞机结构使用钛合金应注意的问题．钛工业进展，1996，No．2

8 胡耀君．飞机用钛量．钛工业进展，1993，No．1

9 王哲．钛合金超塑成形/扩散连接技术在飞机结构上的应用．钛工业进展，1999，No．3

10 周彦邦．钛合金铸造概论．北京：航空工业出版社，2000

11 张翥，罗月新，谢成木等．钛科学与工程（第十届全国钛及钛合金学术交流会文集）．金属学报，1999，第35卷增刊1

12 周宗全．钛合金在卫星工程中的应用．钛工业进展，1993，No．4

13 韩明臣，黄淑梅．钛在美国军工中的应用．钛工业进展，2001，No．2

14 赵永庆，常辉，李佐臣，陈军、西北有色金属研究院创新研制的船用钛合金．钛工业进展，2003，No．6

15 黄嘉琥，应道宴等．钛制化工设备．北京：化学工业出版社，2002

16 黄嘉琥．各国压力容器规范要点．钛工业进展，1995，No．3，No．5

17 余存烨．钛在上海石化的应用．钛工业进展，2003，No．4～6

18 胡启千等．钛合金在空间太阳望远镜中的应用．钛工业进展，2003，No．4～5

19 高敬，宁兴龙．钛制计算机硬盘．钛工业进展，2001，No．1

20 吴全兴．日本福冈圆顶屋的钛屋顶．钛工业进展，1993，No．1，No．4

21 徐祖耀，江伯鸿，杨大智，赵连城等著．形状记忆材料．上海：上海交通大学出版社，2000

22 西北有色金属研究院，宝鸡有色金属加工厂．钛应用实例．《钛工业进展》编辑部，1993

23 刘润泽，陈正云．应用新型结构钛的经济效果．钛工业进展，1999，No．5

24 陶春虎等．航空用钛合金的失效及其预防．北京：国防工业出版社，2002

25 勃拉图辛等．飞机钛合金结构制造技术．北京：北京航空工艺研究所，1998

26 勃拉图辛等．航空装备质量，可靠性和寿命的工艺保证．北京：北京航空材料研究院，1999

27 日本钛加工技术编辑委员会．钛加工技术．吴全兴，曾泉浦等译．西安：钛工业进展编辑部，1997

28 L. Zhou and J. Deng. Current Development of Titanium Science & Technology in China. Proc. of Xi' an International Titanium Conference (XITC' 98), Xi' an, 1998, Vol. 1: 52～64

29 William F., Brown Jr. Aerospace Structural Materials Handbook: Vol4. 36th Edition. 2000

30 R. Boyer et al., Materials Properties Handbook: Titanium Alloys. ASM International, 1995

31 Brina Smith. The Boeing 777. Advanced Materials & Processes, 2003, No. 9: 41～44

32 Глазунов С. Г., Колачев Б. А.. МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ ТИТАНА И ЕГО СПИЛАВОВ. москва: металлургия, 1992

33 Аношкин Н. Ф., Ерманок М. З.. ПОЛУФАБРИКАТЫ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ. москва: онти, вилс, 1996

34 Колаачев Б. А., Полькин И. С., Талалаеб В. Д.. ТИТАНОВЪЫЕ СПЛАВЫ РАЗНЫХ СТРАН. москва: вилс, 2000